

屋内データセンター環境におけるローカル 5G の 4.8GHz 帯電波伝搬測定実験

松戸 孝[†] スハルトノ リオスナタ[†] 川崎 勝[†]

† ネットワンシステムズ株式会社 ビジネス開発本部 第 1 応用技術部 先端技術チーム

† 〒140-8621 東京都品川区東品川 2-2-4 天王洲ファーストタワー

あらまし 屋内のデータセンター環境において、4.8GHz 帯の電波を使ったローカル 5G の実験試験局を運用して電波伝搬測定実験を実施した。その結果、4.8GHz 帯の電波伝搬損失は、勧告 ITU-R P.1238-10 の屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式において、送受信アンテナが垂直偏波の場合には送受信点間距離に対する減衰係数 $N=29$ として近似でき、また、同アンテナが水平偏波の場合には、 $N=28$ として近似できた。4.8GHz 帯の交差偏波識別度 (XPD) は、0dB 以下に劣化する状況が 50% の場所率で発生していたので、同じ 4.8GHz の周波数を同時に、単純に、垂直偏波と水平偏波の直交偏波運用することは困難であると判断できた。建物外壁の屋内側の壁際と屋外側の各地点における伝搬損失について自由空間伝搬損失を基準にして比較することにより、建物外壁の透過損失は 13.9dB であると推定できた。

キーワード ローカル 5G, 伝搬損失, 勧告 ITU-R P.1238, XPD , 建物外壁, 透過損失

Measuring Radio Wave Propagation Characteristics by a Private 5G Radio System in the 4.8 GHz Band Deployed in an Indoor Data Center Environment

Takashi MATSUDO[†] Ryosunata SUHARTONO[†] Masaru KAWASAKI[†]

† Advanced Technology Engineering Department 1, Business Development Division,
NetOneSystems Co., Ltd.

† Tennoz First Tower, 2-2-4 Higashi Shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-8621 Japan

Abstract Radio propagation characteristics were measured by a private 5G radio system in the 4.8GHz band deployed in an indoor data center environment. In the indoor radio path loss estimation formula of Recommendation ITU-R P.1238-10, an attenuation coefficient N of a radio path loss in the 4.8 GHz band was estimated to be 29 for a vertically polarized wave and 28 for a horizontally polarized wave. Since cross-polarization discrimination (XPD) in the 4.8 GHz band deteriorated to 0 dB or less at a location rate of 50%, it was found that simple orthogonal polarization operation is difficult. Comparing the radio path loss measured indoors and outdoors of the building with the radio path loss in free space, it was found that a building entry loss is 13.9 dB.

Keyword Private 5G, Radio path loss, Recommendation ITU-R P.1238, XPD , Exterior wall, Building entry loss

1. はじめに

企業等が自営の無線システムを導入する場合には、無線局免許が不要である手軽さから IEEE802.11 シリーズの無線 LAN を採用することがこれまで一般的であったが、最近、新たな自営の無線システムとしてローカル 5G が登場した。

ローカル 5G は、企業等が自らの建物内や敷地内で運用可能な無線局免許を必要とする自営の 5G(第 5 世代移動通信)システムである[1]。

周波数の使い方としては、免許不要の無線局の無線 LAN と同様に、ローカル 5G は他の免許人が運用するローカル 5G の無線局と同一周波数を共用する[2][3]。しかしながら、ローカル 5G の無線局免許が交付される審査過程では、他の無線局との間で有害な混信が発生しないようにするための事前の調整対応(干渉調整)が必須になっている[4]。その際には、電波伝搬についての知見が基礎となる。

そして、免許不要の無線局の無線 LAN でも、免許ありの無線局のローカル 5G でも、確実に安定した無線通信をするためには、電波伝搬の知見に基づく適切なサービスエリアの設計が基礎となる。

今般、屋内のデータセンター環境において、4.8GHz 帯の電波を使ったローカル 5G の実験試験局を運用して電波伝搬測定実験をする貴重な機会を得て、様々な知見を得ることができた。第 2 章では、電波伝搬損失の測定実験と勧告 ITU-R P.1238 の距離減衰係数の推定について述べる。第 3 章では、交差偏波識別度(XPD)の測定について述べる。第 4 章では、建物周辺屋外へ電波伝搬している状況の測定と建物外壁の透過損失の推定について述べる。

2. (実験 1) 電波伝搬損失の測定と勧告 ITU-R P.1238 の距離減衰係数の推定

2.1. 目的

屋内データセンター環境における 4.8GHz 帯の電波伝搬損失をローカル 5G の実験試験局を運用した測定実験により明らかにする。

本実験で得られる知見は、サービスエリアの範囲を推定する等、回線設計に資することを期待できる。

2.2. 実験場所の環境

図 1 に、実験場所の環境をフロアの平面概要図として示す。実験場所は、6 階建ての建物の 4 階フロアの一部であり、建物は倉庫仕様であり、その構造は鉄骨造である。建物外壁は軽量気泡コンクリートパネルであり、その厚さは観察により 7cm 程度と推測する。図 1 の印は送信装置である 4.8GHz 帯で運用するローカル 5G の基地局のアンテナの位置であるが、その設置されている屋内は、金属製の 19 インチラック

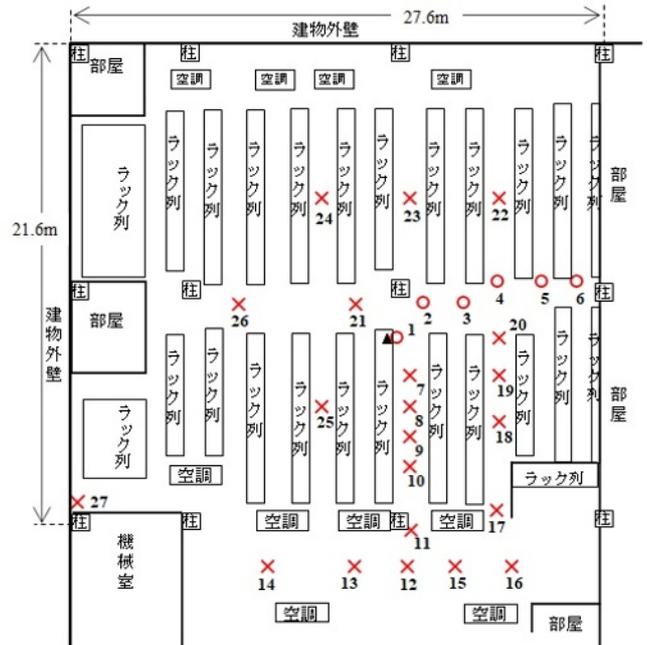


図 1 実験場所の環境 (フロアの平面概要図, 屋内の受信測定地点の位置と番号, 送受信アンテナがともに垂直偏波の場合). ○印: LOS の測定地点 (6 か所), ×印: NLOS の測定地点 (21 か所), □印: 基地局のアンテナの位置。

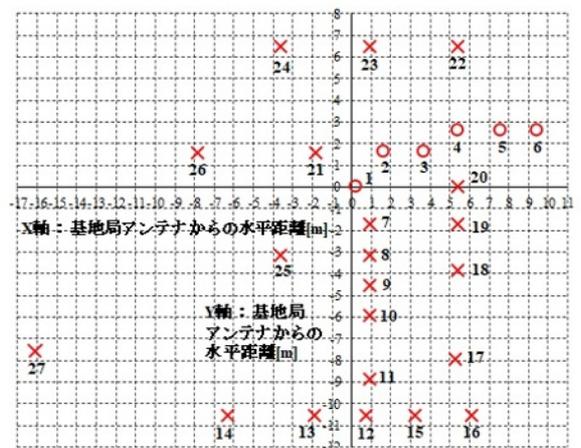


図 2 受信測定地点の位置 (基地局のアンテナからの 2 つの軸の水平距離, 送受信アンテナがともに垂直偏波の場合). ○印: LOS の測定地点 (6 か所), ×印: NLOS の測定地点 (21 か所)。

(高さは床面から約 2.3m) が整然と林立しているデータセンター環境であり、見通しは悪い状況である。図 1 の○印と×印は地点番号を付与した合計 27 の受信測定地点である。○印は、基地局のアンテナと受信測定地点間で見通しがある場合 (LOS: Line of Sight) で 6 か所あり、一方、×印は、基地局のアンテナと受信測定地点間で見通しがない場合 (NLOS: Non Line of Sight) で 21 か所ある。

図2には、基地局のアンテナ位置を原点に設定した場合において、受信測定地点の位置を基地局のアンテナ位置からの2つの軸の水平距離として示す。

図3と4には、実験場所の環境をフロアの立面概要図として示す。天井面の床面からの高さは約6.3mであるが、19インチラックより上部の天井側空間においても、金網面、配線通路、及び空調ダクト等が存在して、見通しは悪い状況である。図3は送受信アンテナがともに垂直偏波の場合であり、一方、図4は送受信アンテナがともに水平偏波の場合である。

なお、送受信アンテナがともに水平偏波の場合には、各アンテナの水平面内で指向性が発生するので、それらの主ビームが概ね対向するような受信測定地点(LOS:7か所、NLOS:7か所、合計14か所)を選択した。具体的には、図5のとおりである。

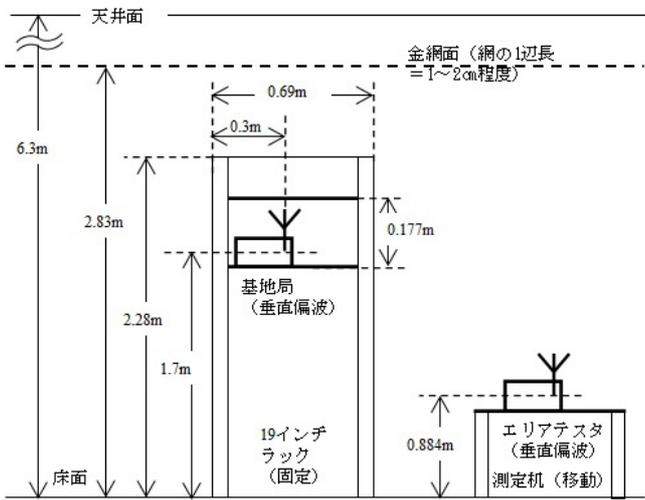


図3 実験場所の環境(フロアの立面概要図、送受信アンテナがともに垂直偏波の場合)

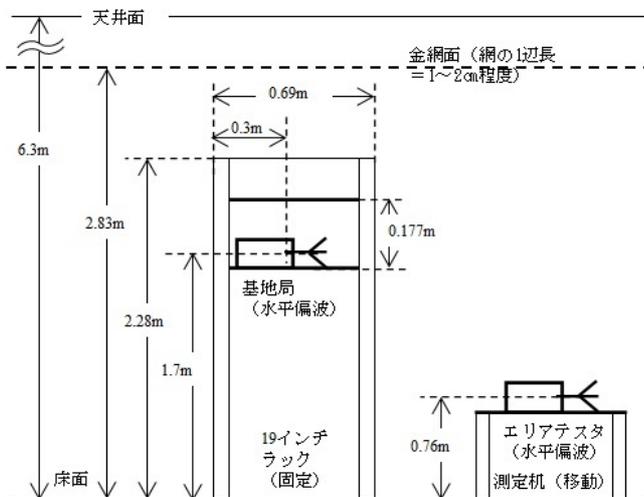


図4 実験場所の環境(フロアの立面概要図、送受信アンテナがともに水平偏波の場合)

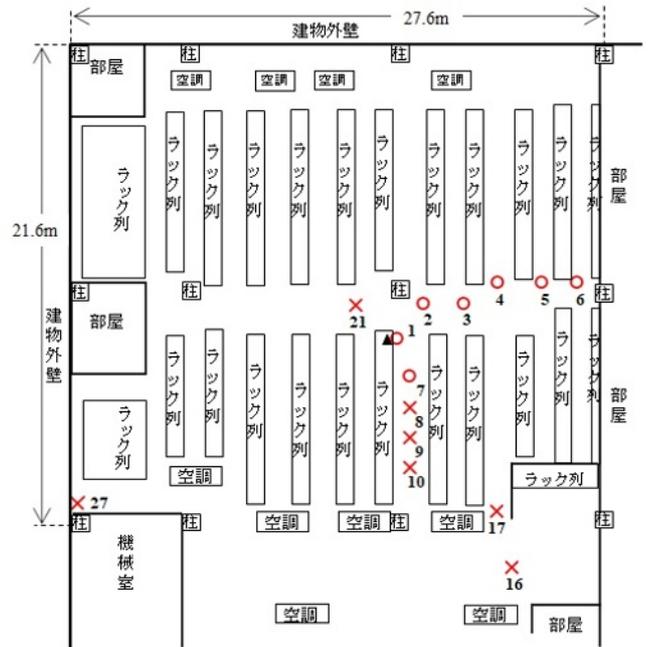


図5 実験場所の環境(フロアの平面概要図、屋内の受信測定地点の位置と番号、送受信アンテナがともに水平偏波の場合)。○印：LOSの測定地点(7か所)、×印：NLOSの測定地点(7か所)、□印：基地局のアンテナの位置。

2.3. 実験方法

実験システムは、表1に示す送信装置(基地局)と受信測定装置(エリアテスト)で構成される。

送受信アンテナがともに垂直偏波の場合には、図1の□印に設置された送信装置のアンテナが送信する4.8GHz帯の電波を、図1の○印と×印の受信測定地点において受信測定装置で受信した。また、送受信アンテナがともに水平偏波の場合には、図1の□印と同じ位置である図5の□印に設置された送信装置のアンテナが送信する4.8GHz帯の電波を、図5の○印と×印の受信測定地点において受信測定装置で受信した。

受信測定装置は、送信波に含まれる同期信号(SSS: Secondary Synchronization Signal)の受信電力(SS-RSRP: Synchronization Signal-Reference Signal Received Power)を1秒毎に測定記録するので、30秒間の測定受信電力の中央値を、ある測定地点における測定受信電力と定義した。伝搬損失 L [dB]は、その測定受信電力と送受信装置の諸元と式(1)から算出した。

$$L = P_{te} + G_t - P_{r0} \quad (1)$$

ここで、

P_{te} : 30kHz幅に相当する基地局送信電力[dBm]=約-17.4dBmである。これは、送信周波数4800MHzの100MHz幅伝送で送信電力60mWなので、30kHz幅の送信電力[mW]を求めて、単位を[dBm]へ変換している。サブ

キャリア周波数間隔=30kHz なので、SS-RSRP の受信帯域幅も 30kHz となる。

G_t : 基地局アンテナ利得[dBi]= 2dBi

P_{r0} : SS-RSRP (中央値) の測定値[dBm]

なお、受信測定装置であるエリアテストの受信アンテナの利得とその他の装置損失はエリアテスト内で補正済みが測定値 P_{r0} になっている。 P_{r0} は受信アンテナに入力する直前の空間における値に相当すると理解できる。

表 1 実験システムの構成

送信装置 (基地局) の諸元	
無線設備の名称	AU-500gNB (エイビット製)
3GPP 標準規格	Release 15 NR 方式準拠
送信周波数	4.8GHz
送信電力	60mW
サブキャリア周波数間隔	30kHz
アンテナの利得, 偏波	2dBi, 垂直, または水平
アンテナの形式	ダイポールアンテナ (垂直偏波時: 水平面無指向性)
アンテナ (給電点) の床面からの高さ	1.7m
受信測定装置 (エリアテスト) の測定諸元	
測定装置の名称	ML8780A (アンリツ製)
受信測定の対象	基地局の下り回線の同期信号 (SSS: Secondary Synchronization Signal)
アンテナの利得, 偏波	3dBi, 垂直, または水平
アンテナの指向性 (垂直偏波時)	水平面無指向性 垂直面半値角幅: -17 ~ +40 度
アンテナ (給電点) の床面からの高さ	0.884m (垂直偏波時), 0.76m (水平偏波時)

2.4. 実験結果

図 6 に送受信アンテナがとも垂直偏波の場合に測定された伝搬損失の測定結果を○印(受信測定地点が LOS の場合)と×印(受信測定地点が NLOS の場合)で示す。同図において、縦軸は伝搬損失であり、横軸は送受信アンテナ間を結ぶ直線距離であり、破線は自由空間伝搬損失である。

同様に、図 7 には送受信アンテナがとも水平偏波の場合に測定された伝搬損失の測定結果を○印(受信測定地点が LOS の場合)と×印(受信測定地点が NLOS の場合)で示す。同図において、縦軸は伝搬損失であ

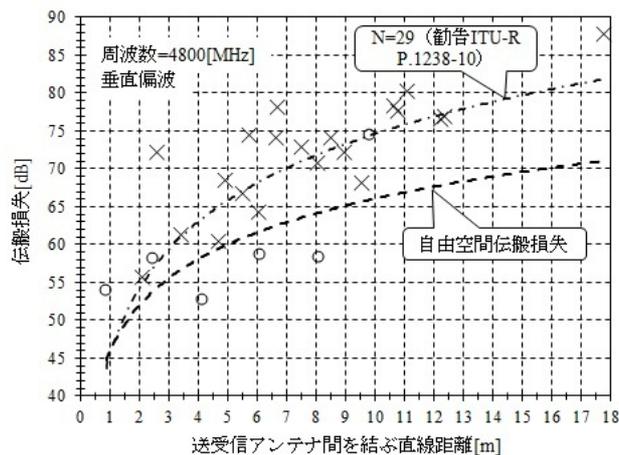


図 6 伝搬損失の測定結果 (垂直偏波) と勧告 ITU-R P.1238-10 での近似。○印: LOS の測定地点 (6 か所), ×印: NLOS の測定地点 (21 か所)。

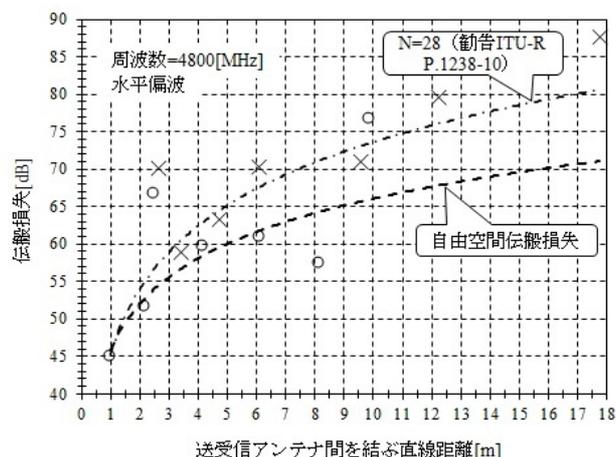


図 7 伝搬損失の測定結果 (水平偏波) と勧告 ITU-R P.1238-10 での近似。○印: LOS の測定地点 (7 か所), ×印: NLOS の測定地点 (7 か所)。

り、横軸は送受信アンテナ間を結ぶ直線距離であり、破線は自由空間伝搬損失である。

なお、図 6 と 7 に示した一点鎖線は、測定された伝搬損失を勧告 ITU-R P.1238-10 の屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式で近似した結果であり、後述の 2.5 節で考察する。

2.5. 考察

2.5.1. 送受信アンテナがともに垂直偏波の場合

送受信アンテナがともに垂直偏波の場合、図 6 から、LOS の受信測定地点 (○印) における伝搬損失は、概ね自由空間伝搬損失の傾向になっていることがわかった。本実験環境では LOS といっても、2.2 節で述べたように、各種の物体等が、送信装置 (基地局) アンテナと受信測定装置 (エリアテスト) のアンテナ間の電波伝搬路の周辺には多数存在し、また、壁面、床面、

及び天井面も存在する空間であり、理想的な自由空間とは異なる環境での測定結果である。従って、伝搬に伴う電波の吸収や反射等の効果が総合的に表れて図 6 の傾向になっていると推測する。

一方、NLOS の受信測定地点(×印)における伝搬損失は、自由空間伝搬損失より約 17dB 大きい状況も発生していることがわかった。

送信アンテナと受信アンテナ間の見通し確保の目安を定量的に表現できる有用な考え方として第 1 フレネルゾーンがある[5],[6],[7]。理論的には、第 1 フレネルゾーンの半分が遮蔽されると、見通しが確保されている状況に比べて受信電力は 6dB 低下し、また、第 1 フレネルゾーンがすべて遮へいされると、見通しが確保されている状況に比べて受信電力は約 16dB 低下する[7]。

2.2 節で述べたように、本実験環境は、天井が高いので、NLOS として、送信装置(基地局)アンテナと受信測定装置(エリアテスト)のアンテナ間の電波伝搬路の見通しを物体等が遮へいしても、その上方周辺には、広い空間が存在している。従って、伝搬に伴う電波の回折や反射等の効果が総合的に表れて図 6 の傾向になっていると推測する。

図 6 に示した一点鎖線は、測定された伝搬損失を勧告 ITU-R P.1238-10 の屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式で近似した結果である。

勧告 ITU-R P.1238-10 における屋内の伝搬損失距離特性 L_{total} [dB] の推定式[8],[9]は、本実験環境のように床・天井・壁等による完全な遮へいがない場合、式(2)で表される。

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d - 28 \quad (2)$$

ここで、

d : 送受信点間距離[m]、但し $d > 1$ m

N : 送受信点間距離に対する減衰係数

f : 送受信周波数[MHz]

図 6 の測定された伝搬損失 ($d < 1$ m となる受信測定地点 1 を除く LOS と NLOS の合計 26 個)を、 $f = 4800$ MHz として、式(2)で近似した結果、 $N = 29$ と算出された。なお、決定係数は 0.53 であり、RMSE (Root Mean Squared Error, 二乗平均平方根誤差)は 5.92dB であった。勧告 ITU-R P.1238-10 の Table2 では、データセンター環境の N の情報がほとんど無い状況なので、本実験で算出された 4.8GHz での $N = 29$ の情報は、推定値の一例として有益である。

2.5.2. 送受信アンテナがともに水平偏波の場合

送受信アンテナがともに水平偏波の場合、図 7 から、LOS の受信測定地点(○印)における伝搬損失は、概ね自由空間伝搬損失の傾向になっていて、図 6 に示した垂直偏波の傾向と同じであると理解できた。

一方、NLOS の受信測定地点(×印)における水平偏波の場合の伝搬損失は、図 6 に示した垂直偏波の場合と同様に、自由空間伝搬損失より約 17dB 大きい状況も発生していることがわかった。水平偏波の場合、NLOS の受信測定地点数は、垂直偏波の場合より少なく 3 分の 1 であるが、水平偏波の場合の図 7 は、垂直偏波の場合の図 6 と概ね同じ傾向であると理解できた。

図 7 に示した一点鎖線は、測定された伝搬損失 ($d < 1$ m となる受信測定地点 1 を除く LOS と NLOS の合計 13 個)を、 $f = 4800$ MHz として、勧告 ITU-R P.1238-10 の屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式で近似した結果である。図 7 の水平偏波の場合は、 $N = 28$ と算出された。なお、決定係数は 0.51 であり、RMSE は 6.8dB であった。

勧告 ITU-R P.1238-10 の Table2 では、偏波の区別の記載が無いので、本実験で算出された 4.8GHz での水平偏波における $N = 28$ の情報は、推定値の一例として有益である。

水平偏波の場合、近似したデータ数が垂直偏波の場合のデータ数の半分であること、及び、受信アンテナの高さが垂直偏波の場合より 12.4cm 低いことには注意すべきであるが、水平偏波の場合の図 7 は、垂直偏波の場合の図 6 と概ね同じ傾向であると理解できた。

3. (実験 2) 交差偏波識別度 (XPD) の測定

3.1. 目的

屋内データセンター環境における 4.8GHz 帯の交差偏波識別度 (XPD: Cross-polarization discrimination) をローカル 5G の実験試験局を運用した測定実験により明らかにする。

本実験で得られる知見は、周波数有効利用の可能性、つまり、同じ周波数を同時に直交偏波運用できるか否かの検討に資することを期待できる。

3.2. 実験場所の環境

実験場所の環境は第 2 章で述べた図 1 から 3 の環境である。但し、送信アンテナが垂直偏波であり、かつ、受信アンテナが水平偏波の場合に測定実験した受信測定地点は、図 1 に示した受信測定地点から 12 か所を選択した。その 12 か所は、図 8 に地点番号とともに示した○印(LOS: 6 か所)と×印(NLOS: 6 か所)である。

図 9 には、送信アンテナが垂直偏波であり、かつ、受信アンテナが水平偏波の場合における実験場所の環境をフロアの立面概要図として示す。

3.3. 実験方法

理論的には、互いに直交する二つの偏波を用いて異なる信号を同時に伝送できれば、周波数の利用効率を 2 倍にすることができる。しかしながら、現実的には、電波が伝搬する過程で反射や回折をする際に偏波が変

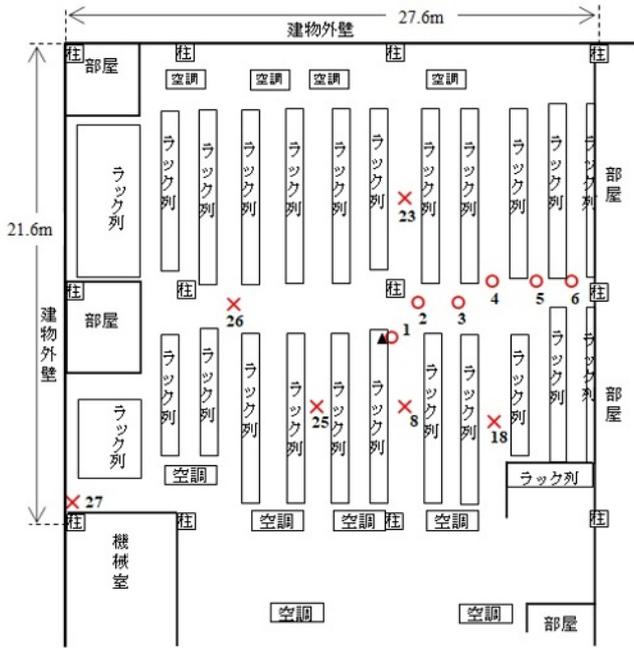


図 8 実験場所の環境 (フロアの平面概要図, 屋内の受信測定地点の位置と番号, 送信アンテナが垂直偏波, かつ, 受信アンテナが水平偏波の場合). ○印: LOS の測定地点 (6 か所), ×印: NLOS の測定地点 (6 か所), 印: 基地局のアンテナの位置.

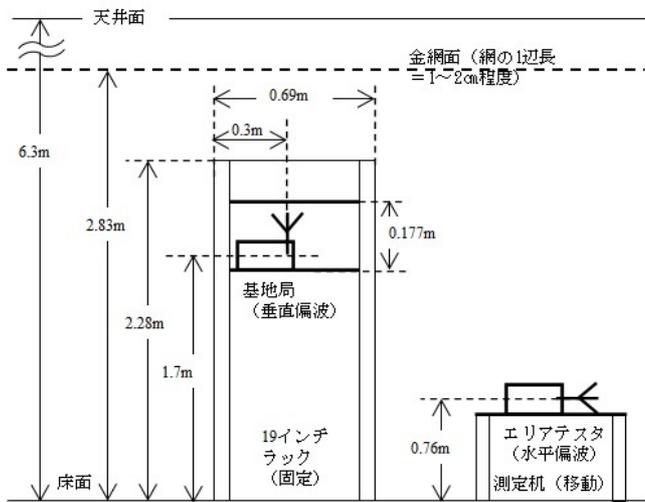


図 9 実験場所の環境 (フロアの立面概要図, 送信アンテナが垂直偏波, かつ, 受信アンテナが水平偏波の場合)

化して, 送信時には直交していた二つの偏波が受信時には非直交の状況, つまり二つの偏波がお互いに回り込んで混信する状況が発生する. この偏波の回り込みの度合いは, 受信信号の主偏波 (Co-polarized signal) と交差偏波 (Cross-polarized signal) との比, 即ち, 交差偏波識別度 (XPD : Cross-polarization discrimination) で表される [10],[11].

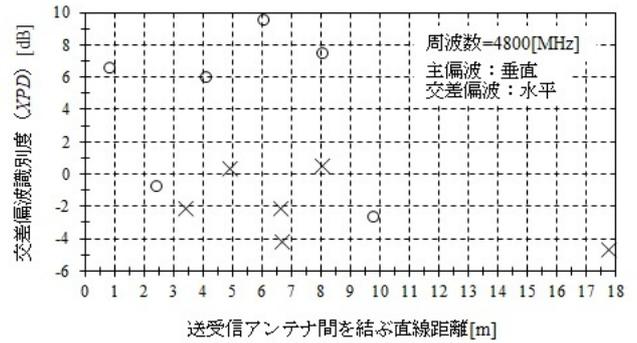


図 10 交差偏波識別度 (XPD) の測定結果. ○印: LOS の測定地点 (6 か所), ×印: NLOS の測定地点 (6 か所).

送信アンテナが主偏波として垂直偏波の場合に, ある受信測定地点において受信アンテナも主偏波と同じ垂直偏波の場合の受信電力 P_{VV} [dBm] と, 同地点において受信アンテナが交差偏波である水平偏波の場合の受信電力を P_{VH} [dBm] とすると, XPD [dB] は, (3) で表される.

$$XPD = P_{VV} - P_{VH} \quad (3)$$

式(3)の P_{VV} は, 2.3 節で述べた実験方法で測定された送受信アンテナがともに垂直偏波の場合の P_{r0} である. 一方, 式(3)の P_{VH} は, 2.3 節で述べた実験方法で測定する際に, 送信アンテナは垂直偏波の場合に, 受信アンテナを水平偏波に変更した場合の P_{r0} である. 3.2 節で述べたように, P_{VH} を測定した受信測定地点数は 12 か所なので, その同じ 12 か所の P_{VV} の測定値を採用して, 式(3)によって XPD を算出した.

3.4. 実験結果

図 10 に XPD の測定結果を ○印 (受信測定地点が LOS の場合) と ×印 (受信測定地点が NLOS の場合) で示す. 同図において, 縦軸は XPD であり, 横軸は送受信アンテナ間を結ぶ直線距離である. なお, 表 1 に示したとおり, 水平偏波の場合の受信アンテナの高さは 0.76m であり, 垂直偏波の場合の同高さ 0.884m より 0.124m 低いが, XPD を図 10 の横軸に示す際には, 垂直偏波の場合の同高さ 0.884m を採用した (水平偏波の場合の同高さ 0.76m を採用した図は, 図 10 と差がわからないことを別途確認済みなので, 図 10 で良いと判断した).

3.5. 考察

図 10 からは, XPD が 0dB 以下, つまり, 垂直偏波で送信しても, 受信したときに水平偏波に変化している状況が 50% (12 か所の受信測定地点のうち 6 か所) の場所率で発生していると理解できた. また, LOS であっても XPD が 0dB 以下となる状況も発生していることがわかった. 従って, 本実験環境では, 同じ 4.8GHz の周波数を同時に, 単純に, 垂直偏波と水平偏波の直

交偏波運用することは困難であると判断できる。なお、もしも、垂直偏波と水平偏波の各成分に信号処理を実施して直交化する等の工夫をした場合には、直交偏波運用はありえるかもしれない。

4. (実験3) 建物周辺屋外へ電波伝搬している状況の測定と建物外壁の透過損失の推定

4.1. 目的

屋内データセンター環境に設置された 4.8GHz 帯のローカル 5G の実験試験局の基地局の電波が建物周辺屋外へ伝搬している状況を測定実験により明らかにする。

本実験で得られる知見は、同じ周波数帯を共用する他無線局との干渉調整の検討に資することを期待できる。

4.2. 実験場所の環境

4.2.1. 建物の屋内の環境

送信装置である 4.8GHz 帯で運用するローカル 5G の基地局のアンテナが設置されている屋内における実験場所の環境は、2.2 節で述べたとおりである。南側に位置する建物外壁の屋内側の壁際における 3 つの受信測定地点は、図 11 に示す地点番号を付与した × 印である。

その測定地点での受信測定装置（エリアスタ）のアンテナと送信装置のアンテナ間を結ぶ直線距離は約 13m であるが、見通しはなし（NLOS）である。また、

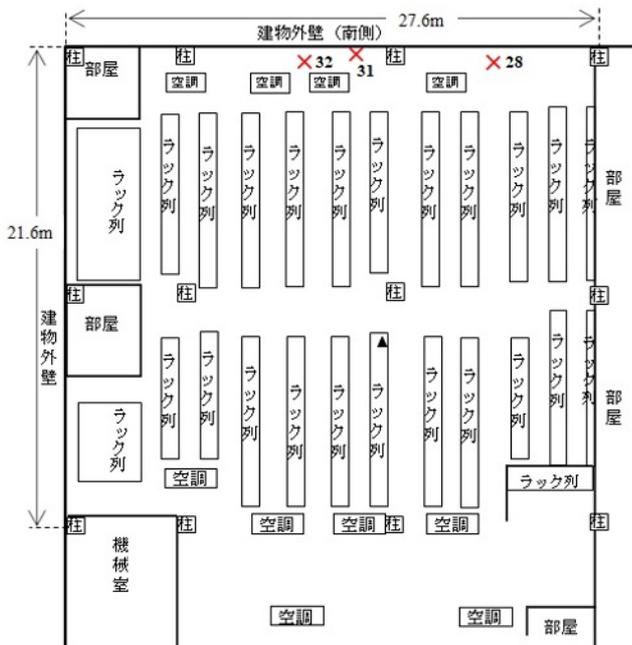


図 11 実験場所の環境（フロアの平面概要図、南側に位置する建物外壁の屋内側の壁際における受信測定地点の位置と番号）。×印：NLOS の測定地点（3 か所）、印：基地局のアンテナの位置。

その屋内壁際の 3 つの測定地点は、建物外壁の屋内側の壁面から約 1m の距離に位置し、壁面に沿った約 9.7m の範囲に存在する。

実験場所の環境のフロアの立面概要図も、基本は図 3 と同じであるが、本実験では、受信測定装置のアンテナ（給電点）の床面からの高さは、安全確保の状況に応じて、可能な場合には 4 種類（0.94m、0.99m、1.47m、及び 1.75m）から選択した。

4.2.2. 建物の周辺屋外の環境

図 12 には 9 つの屋外測定地点（S4、S5、S7、S8、S10、S11、S13、S14、及び S15）と 4.2.1 項で述べた屋内壁際の 3 つの測定地点（28、31、32）の位置、及び、各測定地点の基地局からの概ねの水平距離を地理院地図（国土交通省 国土地理院が運用するウェブ地図）に示す。

送信装置である 4.8GHz 帯で運用するローカル 5G の基地局のアンテナが 4 階フロアに屋内設置された建物の北側、東側、及び西側の周辺には他の建物が隣接しているので 4 階フロアからそれら 3 方向への見通しは、遮へいされる状況である。

一方、南側に位置する建物外壁の屋外側では、隣接する他の建物はなしであり、建物外壁とさらに南側へ離れた 8 つの屋外測定地点（S4、S5、S7、S10、S11、S13、S14、及び S15）間の見通しはあり（LOS）である。なお、さらに 1 か所の屋外測定地点 S8 は、直近の土地境界に存在する壁により、建物外壁との間の見通しはなし（NLOS）である。



図 12 測定地点（屋外と屋内壁際）の位置と基地局からの概ねの水平距離、×印：基地局のアンテナの位置。地理院地図（国土交通省 国土地理院が運用するウェブ地図）を加工して作成。



図 13 測定地点での受信アンテナ（給電点）と 基地局の送信アンテナ（給電点）の標高，×印：基地局のアンテナの位置．地理院地図（国土交通省 国土地理院が運用するウェブ地図）を加工して作成．

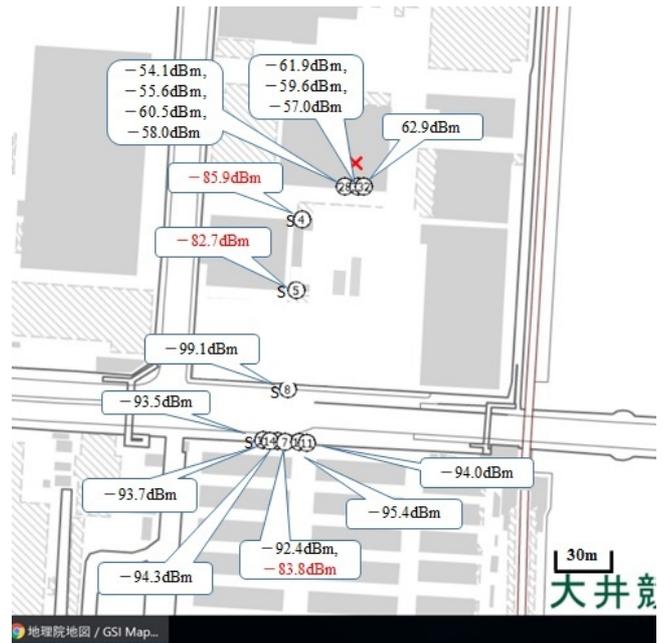


図 15 SS-RSRP の測定結果を 100MHz 幅に換算した受信電力，×印：基地局のアンテナの位置．地理院地図（国土交通省 国土地理院が運用するウェブ地図）を加工して作成．

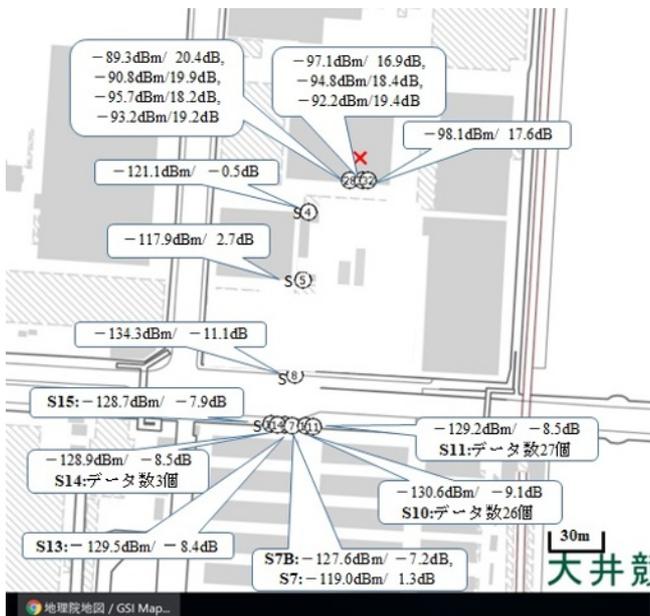


図 14 SS-RSRP/SS-SINR の測定結果，×印：基地局のアンテナの位置．地理院地図（国土交通省 国土地理院が運用するウェブ地図）を加工して作成．

図 13 には、各測定地点での受信アンテナ（給電点）と 基地局の送信アンテナ（給電点）の標高を示す．

図 12 に屋外南側 6 か所と示された屋外測定地点(S7, S10, S11, S13, S14, 及び S15) は、建物外壁の壁面に沿った方向、即ち、概ね東西方向の約 22.6m の範囲に存在する．その各屋外測定地点での受信測定装置の

アンテナと 4 階フロアに屋内設置された送信装置のアンテナ間を結ぶ直線距離は約 150m である．そして、その直線が建物外壁と成す角度は、水平面で見るときに、約 80 度である．また、受信測定装置のアンテナから見た送信装置のアンテナの仰角は約 7 度である．

なお、その屋外南側 6 か所の屋外測定地点から建物の南側の外壁を観察すると、軽量気泡コンクリートパネル以外に、窓ガラス部分と金属製の非常口部分が存在する．送信装置が屋内設置された 4 階フロア部分の南側の外壁の面積に着目すると、窓ガラス部分の面積比率は 1.4%、金属製の非常口部分の同比率は 0.9%、及び、軽量気泡コンクリートパネル部分の同比率は 97.7% である．

4.3. 実験方法

4.2 節で述べた受信測定地点において、2.3 節で述べた実験方法を実施した．なお、送受信アンテナは垂直偏波であった．

また、受信測定装置（エリアスタ）で SS-RSRP と同時に 1 秒毎に測定記録されている下り回線の送信波に含まれる同期信号の SS-RSRP と雑音電力 + 干渉波電力の比（SS-SINR: Synchronization Signal-Signal to Interference plus Noise Ratio)も、30 秒間の SS-SINR の中央値を、ある測定地点における SS-SINR と定義して、測定した．

4.4. 実験結果

図 14 に、受信測定地点における SS-RSRP と SS-SINR

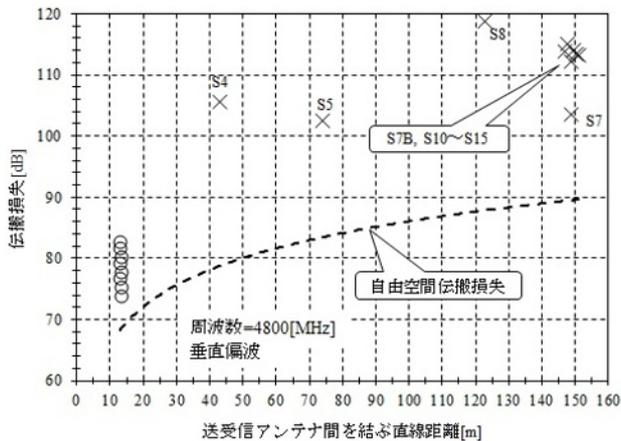


図 16 伝搬損失の測定結果．○印：屋内壁際の測定地点（3 か所，NLOS），×印：建物外壁から南側へ離れた屋外測定地点（NLOS）．

の測定結果を示す．なお，2.3 節で述べたように，測定結果は 30 個の測定記録データの中央値を原則とするが，測定地点 S14，S10，及び S11 においては，中央値を算出する元になる測定記録データの数は，30 個未満であり，各々，3，26，及び 27 個であった．

2.3 節で述べたように，サブキャリア周波数間隔 = 30kHz なので，SS-RSRP の受信帯域幅も 30kHz となる．そこで，図 15 に，受信測定地点における SS-RSRP の測定結果を 100MHz 幅に換算した受信電力を示す．なお，屋外の受信測定地点における赤色の受信電力は，後述の考察で着目する - 91.0dBm 以上の場合である．

図 16 に，伝搬損失の測定結果を○印(受信測定地点が建物外壁の屋内側の壁際の場合)と×印(受信測定地点が屋外の場合)で示す．同図において，縦軸は伝搬損失であり，横軸は送受信アンテナ間を結ぶ直線距離であり，破線は自由空間伝搬損失である．

4.5. 考察

4.5.1. 建物外壁から南側の屋外へ伝搬している状況

図 14 からは，SS-SINR が負になる状況は多いけれども，SS-RSRP は弱いながらも受信できていることがわかった．測定地点 S14，S10，及び S11 において，中央値を算出する元になる測定記録データの数が，30 個未満になった理由は不明であるが，例えば，受信電力の低下がかなり大きかったということも想定される．

4.8GHz 帯における 100MHz 幅システムの場合，総務省が定めた受信電力の定義は，カバーエリアが - 84.6dBm 以上であり，干渉調整エリアが - 91.0dBm 以上である．この場合，陸上移動局の受信アンテナの利得は 0dBi かつ同地上高は 1.5m が想定されている[4]．ここで SS-RSRP の測定結果は，2.3 節で述べた P_{r0} なので，受信アンテナ利得は 0dBi に相当であるが，屋外

測定地点での受信アンテナの地上高は，0.94m または 0.99m であることを承知の上で図 15 を参照する．SS-RSRP の測定結果を 100MHz 幅に換算した受信電力を示す図 15 からは，受信電力を赤色で示す測定地点 S4，S5，及び S7 が，干渉調整エリアに該当した．測定地点の基地局からの概ねの水平距離を示す図 12 からは，測定地点 S4，S5，及び S7 は，各々 40，72，及び 148m である．

屋内設置の表 1 に示す仕様の基地局のアンテナの標高が，図 13 に示すように 20.9m であり，かつ，建物外壁の屋外側の見通しがある場合には，屋外において上述の程度の電波伝搬もあるということがわかったことは有益である．

4.5.2. 屋内壁際と建物外壁から南側へ離れた測定地点における伝搬損失の状況

4.2.1 項で述べたように屋内壁際の 3 つの測定地点（28，31，32）では，安全確保の状況に応じて，可能な場合には受信アンテナの高さを複数の値に変更して測定したので，図 16 の○印で示される伝搬損失は 8 個である．この 8 個の中央値を求めると，伝搬損失は 79dB となった．

一方，図 12 に屋外南側 6 か所と示された建物外壁から南側へ離れた 6 つの屋外測定地点（S7，S10，S11，S13，S14，及び S15）では，図 13 に示すように測定地点 S7 の受信アンテナの高さは 2 種類あるので，図 16 の横軸約 150m において×印で示される伝搬損失は 7 個である．ここで，4.4 節で述べたように測定地点 S14 における SS-RSRP の中央値を算出する元になる測定記録データ数が 30 個未満の 3 個と極端に少なかった．従って，測定地点 S14 の伝搬損失の測定結果は不採用として，測定地点 S14 以外の 5 つの測定地点（S7，S10，S11，S13，及び S15）で測定された 6 個の伝搬損失を採用して，その 6 個の中央値を求めると伝搬損失は 114dB となった．この後も，測定地点 S14 の伝搬損失の測定結果は不採用として考察を進める．

4.5.3. 建物外壁の透過損失を推定する簡易な考え方

図 16 に示す伝搬損失の測定結果について，4.2.2 項で述べたように図 12 に屋外南側 6 か所と示された屋外測定地点（S7，S10，S11，S13，S14，及び S15）での受信アンテナと屋内の送信アンテナ間を結ぶ直線が仰角約 7 度，即ち，概ね水平であり，及び，同直線が建物外壁と成す水平面の角度は，約 80 度，即ち，概ね垂直であることを考慮することによって，本実験環境における建物外壁の 4.8GHz 電波に対する透過損失を，以下に示す簡易な考え方で推定した．

図 16 の○印で示される伝搬損失[dB]を $Loss_I$ とすると次式で示されると考える．

$$Loss1 = L_{fs1} + L_{nlos1} \quad (4)$$

ここで、

L_{fs1} ：屋内壁際の測定地点における自由空間伝搬損失[dB]

L_{nlos1} ：屋内壁際の測定地点における送受信アンテナ間の見通しなし(NLOS)の状況によって発生した伝搬損失[dB]

式(4)から、次式が得られる。

$$L_{nlos1} = Loss1 - L_{fs1} \quad (5)$$

図 16 と式(5)から 8 個の L_{nlos1} が得られるが、 L_{nlos1} の中央値は 10.1dB となった。

同様に、図 16 の横軸約 150m において x 印で示される伝搬損失[dB]を $Loss2$ とすると次式で示されると考える。

$$Loss2 = L_{fs2} + L_{nlos1} + L_p \quad (6)$$

ここで、

L_{fs2} ：図 16 の横軸約 150m の屋外測定地点における自由空間伝搬損失[dB]

L_{nlos1} ：上述のとおり

L_p ：建物外壁の透過損失[dB]の推定値

本実験環境では、屋外測定地点の受信アンテナと屋内の送信アンテナ間を結ぶ直線が仰角約 7 度、即ち、概ね水平であり、及び、同直線が建物外壁と成す水平面の角度は、約 80 度、即ち、概ね垂直であるので、 $Loss2$ は簡易な式(6)で表現可能と考えた。

式(6)から、次式が得られる。

$$\begin{aligned} L_p &= Loss2 - L_{fs2} - L_{nlos1} \\ &= L_{nlos2} - L_{nlos1} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$L_{nlos2} = Loss2 - L_{fs2} \quad (8)$$

である。

4.5.2 項で述べた図 16 の横軸約 150m における状況と式(8)から 6 個の L_{nlos2} が得られるが、 L_{nlos2} の中央値は 24.0dB となった。

従って、式(7)の右辺の各項に上述の各中央値 24.0dB と 10.1dB を代入すると、建物外壁の透過損失の推定値である L_p は、13.9dB となる。

4.5.4. 推定された建物外壁の透過損失の吟味

本実験試験局の設置環境における建物外壁の透過損失は 4.8GHz の周波数において 13.9dB と推定できた。この推定結果は、ローカル 5G 向けの総務省の訓令で規定する建物侵入損失[4]の 16.2dB より、2.3dB 小さい。また、勧告 ITU-R P.2109-1 に記載ある建物侵入損失の中央値の推定式(Building type:Traditional)[12],[13]から導かれる推定値 15.6dB より、1.7dB 小さい。この差分は、例えば、建物外壁に存在する窓ガラス部分(面積比率 1.4%)の影響の可能性も考えられる。

屋内と屋外の間を透過や侵入することに伴う電波の

伝搬損失を様々な材質の外壁等で囲まれた現実の立体構造の建物において、適切かつ容易に把握することは難しいと考える。しかしながら、本考察で述べる建物外壁の透過損失の推定方法は、簡易な測定実験と考え方に基づくが、概ねの状況を推定して把握することに貢献できると考える。

5. まとめ

屋内のデータセンター環境において、4.8GHz 帯の電波を使ったローカル 5G の実験試験局を運用して電波伝搬測定実験を実施し、以下のことがわかった。

(1)4.8GHz 帯の電波伝搬損失は、勧告 ITU-R P.1238-10 の屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式において、送受信アンテナが垂直偏波の場合には送受信点間距離に対する減衰係数 $N=29$ として近似でき、また、送受信アンテナが水平偏波の場合には、 $N=28$ として近似できることがわかった。

勧告 ITU-R P.1238-10 では、データセンター環境の N の情報がほとんど無い状況なので、本実験で算出された上記の N の値の情報は推定値の一例として有益である。

(2)4.8GHz 帯の交差偏波識別度(XPD)は、0dB 以下に劣化する状況が 50%の場所率で発生していたので、同じ 4.8GHz の周波数を同時に、単純に、垂直偏波と水平偏波の直交偏波運用することは困難であると判断できた。

(3)屋内設置された 4.8GHz 帯のローカル 5G の実験試験局の基地局の電波が建物周辺屋外へ伝搬している状況を明らかにすることができた。さらに、建物外壁の屋内側の壁際と屋外側の各地点における伝搬損失について自由空間伝搬損失を基準にして比較することにより、実験試験局の設置環境における建物外壁の透過損失は 4.8GHz の周波数において 13.9dB と推定できた。本推定方法は、簡易な測定実験と考え方に基づくが、概ねの状況を推定して把握することに貢献できると考える。

今後の課題は、広帯域情報伝送と電波伝搬の関係の知見を深めて、スループット劣化等の原因をより適切に把握できるようにすることである。

謝 辞

ローカル 5G の実験試験局の免許交付にご対応いただいた総務省 関東総合通信局 無線通信部 陸上第一課の皆様へ感謝する。基地局についてご指導いただいた株式会社エイビットの藤野学様に感謝する。エリアテスタについてご指導いただいたアンリツ株式会社の丸田純一様、高橋昇様、及び、有賀龍二様に感謝する。日ごろよりご指導いただくネットワンシステムズ株式会社の各位に感謝する。

文 献

- [1] 総務省, “ローカル 5G 導入に関するガイドライン, 報道資料 無線局免許手続規則に基づく無線局の設置する地域に関する告示案に係る意見募集の結果及びガイドライン改定版の公表,” 総務省, https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000485.html, 2020 年 12 月 11 日, 参照 Aug.23, 2021.
- [2] 松戸孝, “ローカル 5G も WiFi と同じ、皆で周波数共用だよ ~ とある技術者から友人 A 君への手紙 ~”, Net One Blog, “ネットワークシステムズ”, <https://www.netone.co.jp/knowledge-center/netone-blog/20200710-1/>, 2020 年 7 月 10 日, 参照 Aug.23, 2021.
- [3] 松戸孝, “ローカル 5G と WiFi の使い分け、その考え方案 ~ とある技術者から友人 A 君への手紙 ~”, Net One Blog, “ネットワークシステムズ”, <https://www.netone.co.jp/knowledge-center/netone-blog/20201218-1/>, 2020 年 12 月 18 日, 参照 Aug.23, 2021.
- [4] 第 5 世代モバイル推進フォーラム 地域利用推進委員会, “ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.02 版,” 第 5 世代モバイル推進フォーラム, https://5gmf.jp/wp/wp-content/uploads/2021/04/local-5g-manual2_02.pdf, 2021 年 5 月 10 日, <https://5gmf.jp/case/4484/>, 参照 Aug.23, 2021.
- [5] 進士昌明, “無線通信の電波伝搬, 第 2 章伝搬の法則”, 電子情報通信学会, <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784885521027/>, コロナ社, 1993 年 6 月 1 日 (2 版), ISBN978-4-88552-102-7, 参照 Aug.23, 2021.
- [6] 唐沢好男, 藤井威生, “電波システム工学, 第 2 章無線伝送の基本モデル”, 電子情報通信レクチャーシリーズ D-15”, 電子情報通信学会, コロナ社, 2020 年 9 月 30 日 初版第 1 刷, <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339018752/>, ISBN978-4-339-01875-2, 参照 Aug.23, 2021.
- [7] 高田潤一, “(第 1 回) 電波伝搬の基礎理論”, 映像情報メディア学会誌, Vol.70, No.1, 2016, https://www.ite.or.jp/contents/tech_guide/tech_guide/201601_201701.pdf, 参照 Aug.23, 2021.
- [8] Rec. ITU-R P.1238-10: “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz”, ITU-R Recommendations P Series, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-10-201908-I/en>, Aug. 2019, 参照 Aug.23, 2021.
- [9] 守倉正博, 久保田周治, “改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書 第 11 章高速無線 LAN 環境における電波伝搬”, インプレス R&D, 2008 年 4 月 11 日, ISBN978-4-8443-2546-8.
- [10] 進士昌明, “無線通信の電波伝搬, 第 4 章大気ガスおよび降水の性質”, 電子情報通信学会, <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784885521027/>, コロナ社, 1993 年 6 月 1 日 (2 版), ISBN978-4-88552-102-7, 参照 Aug.23, 2021.
- [11] 今井哲郎, “(第 6 回) 移動通信の電波伝搬”, 映像情報メディア学会誌, Vol.70, No.6, 2016, https://www.ite.or.jp/contents/tech_guide/tech_guide/201601_201701.pdf, 参照 Aug.23, 2021.
- [12] ITU-R, “Prediction of building entry loss, Recommendation ITU-R P.2109-1,” ITU-R, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2109-1-201908-I/en>, Aug. 2019, 参照 Aug.23, 2021.
- [13] 情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会, “参考資料 9 : 壁等の通過時の損失について,” 構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件, pp.216-218, 総務省, https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban16_02000232.html, 2020 年 2 月 21 日, 参照 Aug.23, 2021.