U.D.C 537.8.7

マルチパス環境下における IEEE 802.11ah の電波伝搬特性評価

渡辺　拓人*　　井上　大輔*　　入野　祥宏*　　羽田　芳朗*

要　約：　Wi-Fi 規格の一つである IEEE 802.11ah は LPWA（Low-Power Wide-Area）に分類される無線通信であり，小電力，長距離伝送の特徴を生かし，IoT での利用をはじめ，ドローン用の通信手段などへの適用が検討されている。近年，人の立ち入りが困難な下水管の検査や施工中の水路トンネルの巡視にドローンを活用することが期待されるが，下水管などの狭所空間では電波が反射を繰り返す“マルチパス環境”となり，マルチパス環境では局所的に Null 点が生じる事に起因して通信が不安定になることが知られている。マルチパス環境で無線通信のトラブルを回避する対策を講じるには，事前に電波伝搬状態を評価して Null 点の出現位置を予測することが有効であると考えられる。本稿では，マルチパス環境における IEEE 802.11ah の電波伝搬特性のシミュレーションを行い，実測結果と比較して Null 点の出現位置の予測の可能性について検討したので報告する。

キーワード：　IEEE 802.11ah，マルチパス環境，Null 点，Ray-trace 法

目　次：

1. はじめに
2. マルチパス環境を対象とした既往研究
3. Ray-trace 法解析および実測
4. まとめ

1. はじめに

IoT で利用されている無線通信には Bluetooth, Zigbee, LoRa 等の様々な規格があり，通信に使用される周波数は 2.4 GHz 帯や 920 MHz 帯が主流である。近年では Wi-Fi 規格の一つである IEEE 802.11ah（以降，11ah と表記）が注目されている。11ah は LPWA（Low-Power Wide-Area）と呼ばれるカテゴリーの 920 MHz 帯の無線通信規格であり，2.4 GHz 帯や 5 GHz 帯の無線 LAN と同じように IP（Internet Protocol）通信が可能であるため，LPWA でありながらインターネットへの接続を容易に行うことができる。そのため，例えばモバイル回線圏外の地下空間や山岳地帯でネットワークを構築する用途などが考えられる[1)]。別の用途として，人の立ち入りが困難な下水管やトンネル内の検査や巡視で利用するドローンの通信手段としても期待されている。本稿では狭所空間として下水管を対象に議論する。

近年，狭所空間を飛行するドローンの研究が行われており，例えば NEDO の研究プロジェクト[2) 3)]がある。このプロジェクトでは狭所空間における機体の飛行性能の評価手法を研究対象としており，狭所空間における無線通信の性能評価に関する報告は行われていない。既往のドローンの研究では広い屋外の空間での飛行を前提にしたものが大半であり，下水管のような狭い空間を対象とした無線通信の研究事例は殆んどない。ドローンやロボットなどの無人移動体と遠隔操作者との間の通信手段として，総務省では 920 MHz 帯（最大送信出力 20 mW）および 2.4 GHz 帯（最大送信出力 10 mW/MHz）を免許不要で利用できる帯域と定めている[4)]。

とりわけ 920 MHz 帯の無線は，これまで利用されてきた 2.4 GHz 帯の無線方式と比べて通信距離が長くなることに加えて，建物や樹木等の障害物の多い環境でも減衰が小さく回折しやすいという特徴がある。この特徴を生かし，ドローンやロボットを見通し外から遠隔操作するためのコマンド通信やテレメトリデータを通信する目的で 920 MHz 帯の無線を利用したマルチホップ制御通信システムの研究[5) 6)]が行われている。

下水管内では電波は反射を繰り返しながら伝搬し，直接波と複数の反射波が干渉するマルチパス環境になる。電波の反射は主に下水管の内壁を構成する鉄筋コンクリートや金属の面で生じるが，材質により反射率が異なり，結果として電波伝搬の状態が異なると考えられる。電波伝搬特性に着目した下水管の分類を図 1 に示す。下水管の材質はコンクリートが最も多く，供用延長の約半分を占める[7)]。本稿では矩形断面の鉄筋コンクリートと円形断面の導電体を検討対象とする。

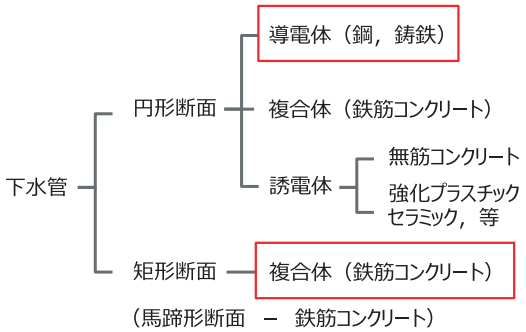


図 1　下水管の形状や構成材料による分類

＊技術研究所　先端デジタルグループ

下水管のような狭所空間のマルチパス環境で無線通信を行う場合，搬送波の直接波と反射波，もしくは反射波同士が干渉し合うことで Null 点と呼ばれる場所が発生する。Null 点では急激に受信電力が低下し，通信状態が悪くなることが知られている[8]。Null 点の発生頻度は無線で使用する電波の波長に依存し，2.4 GHz 帯に比べて周波数が低い 920 MHz 帯の方が Null 点の発生頻度は低くなると考えられる。実際には Null 点は局所的に形成されることが多いため，サイトサーベイのような簡易な実測調査では発見が困難な場合があり，Null 点への対策を講じることができない。そもそも人の立ち入りが困難な下水管のような場所ではサイトサーベイの実施自体が困難であるため，電波伝搬シミュレーションにより事前に Null 点の出現箇所を予測して対策を行えることが望ましい。

2. マルチパス環境を対象とした既往研究

マルチパス環境における電波伝搬の研究として福澤らの研究[9]がある。この研究ではアルミ製矩形筐体（0.4 m×0.4 m×3.6 m）内部に送受信アンテナを設置し，電波が反射を繰り返すマルチパス環境を人工的に作成し，送受信距離に対する受信電力の変化や送受信距離に対するスループットを計測している。この研究では特定の位置で受信電力が大きく減衰する Null 点が検知されることが報告されている。西田らの研究[10]ではカーブや起伏のある地下鉄トンネルにおける 2.4 GHz 帯 Wi-Fi の電波伝搬特性について実測と解析の結果が比較されており，長さ 1200 m，断面の幅が 4.88 m のトンネルでは局所的に受信電力の変動が大きくなり，Null 点では 20 dB 程度変動することが報告されている。石原の研究[11]では下水管内における 5 GHz 帯 Wi-Fi 電波の受信信号強度を調査し，下水管内では電波の減衰が自由空間に比べて大きく，管の入口から距離 8 m 程度で受信強度が Wi-Fi 通信が困難な－90 dBm を下回ることが報告されている。

本稿では，下水道のような人の立ち入りが困難な場所で，サイトサーベイを行うことなく Null 点の出現位置を予測できるかどうかを検討することを目的として，狭所空間のマルチパス環境における電波伝搬特性について，シミュレーションにより 2.4 GHz 帯，5 GHz 帯および 920 MHz 帯における Null 点の出現位置や発生頻度について検証した。更に 920 MHz 帯ではシミュレーション結果と実測結果を比較してシミュレーションによる Null 点の出現位置の予測可否について考察した。電波伝搬の解析には Ray-Trace 法[12]を用いた。Ray-Trace 法は電波を無数のレイ（光線）と見なし，構造物から反射するレイの軌跡を幾何学的にトレースして解く「幾何光学近似手法」であり，管内のように反射を繰り返して伝搬する場合においても複数の伝搬経路（マルチパス）ごとの受信電力の計算を行うことで，受信点における搬送波の受信電力を算出し，その受信電力を各種無線通信の変調方式を考慮した最低受信レベルを閾値として比較することで，通信の可否を評価することができる。

3. Ray-trace 法による解析と実測

3.1 円形鋼管カルバート

下水管のカルバートを模擬した断面形状が円形の鋼管と，ボックスカルバートを模擬した断面形状が矩形の狭所空間を対象に，Ray-trace 法による電波伝搬の解析を行った。図 2 に示すようなパイプカルバートを模擬した解析モデルを用いてマルチパスに起因する受信レベルの変動を確認する。なお，解析周波数は 11 ah で用いられる 920 MHz，従来の Wi-Fi で用いられる 2.45 GHz（IEEE 802.11n），および 5.2 GHz（IEEE 802.11ac 等）の 3 種類とし，送信アンテナ（*Tx.*）位置は（0，0.28，0），送信電力は 0 dBm に設定し，z 軸上における受信電力を解析した。Null 点とは受信電力が低下して通信不可となる位置を指すことが一般的であるが，本稿では 10 m 以内の近距離を評価対象としていることから，－50 dB 以下を Null 点として扱うこととした。図 3 に各周波数における z 軸上における受信電力の解析結果を示す。

参考のため，自由空間における減衰カーブ（理論値）も図示している。この結果から 920 MHz では約 8.2 m の位置に大きい減衰を有する Null 点を確認することができ，5.2 GHz においても 4.8 m および 7.5 m 付近に大きな減衰

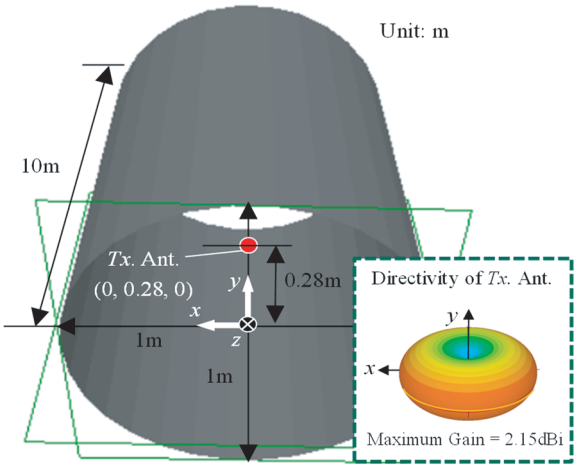


図 2　円形金属管の解析モデル

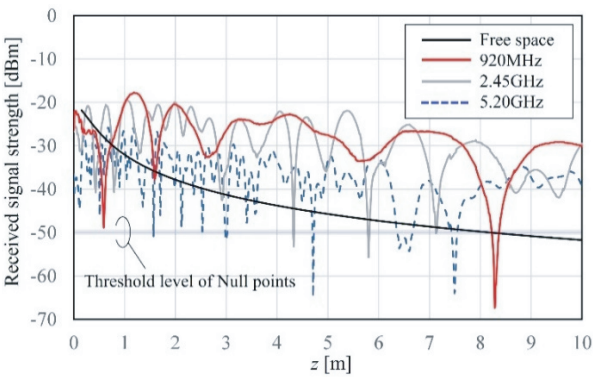
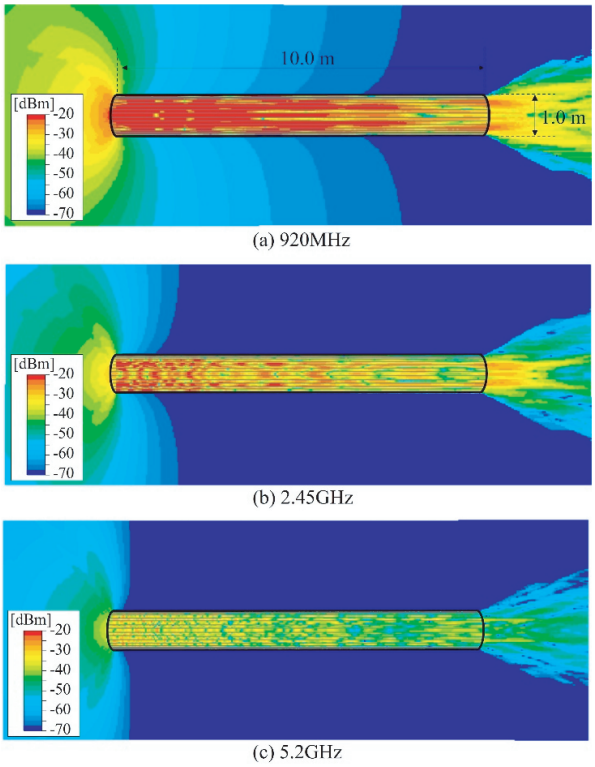


図 3　円形金属管中央における解析結果（z 方向）

を有する Null 点が確認できる。2.45 GHz の結果と比較すると，周波数が高いほど Null 点の出現数が多くなり発生周期が細かくなることが分かる。Wi-Fi 通信の可否は最低受信感度で判断することができ，2.4 GHz 帯や 5 GHz 帯では約－80 dBm，920 MHz 帯では約－95 dBm を下回ると通信切断が生じる可能性がある。解析対象とした 10 m 以内の範囲では－80 dBm に比べて大きい受信電力が得られているが，送受信間距離がさらに大きくなると Null 点において通信切断が生じる可能性があると考えられる。



(a) 920MHz

(b) 2.45GHz

(c) 5.2GHz

図 4　円形金属管（$y=0$）における受信電力分布

円形断面の金属管の $y=0$ における xz 平面の受信電力分布の解析結果を図 4（a）～（c）に示す。円形金属管内では，920 MHz において最も高い受信電力が得られることが分かる。また 2.45 GHz，では金属管内部において受信電力が干渉縞のように分布し，マルチパスに起因した反射の影響が顕著に現れている様子が併せて確認できる。

3.2　矩形の狭所空間

次に断面形状が矩形の狭所空間について解析を行った。図 5 に示すように解析空間は高さ 2.3 m，幅 3.0，奥行 13.0 m とし，送信アンテナ（*Tx.*）および受信アンテナ（*Rx.*）は床上 1.65 m に配置して送受信アンテナ間の受信電力分布を解析した。解析周波数は 920 MHz とし，側面の金属製扉は PEC（Perfect Electric Conductor），それ以外の壁・床・天井は誘電体としてモデル化した。図 6 に床から高さ 1.65 m における受信電力分布の解析結果を示す。この結果から金属管同様に空間内における受信電力の変動を確認することでき，受信電力が局所的に弱くなる Null 点が生じることを確認した。

以上の解析結果から，断面形状が円形および矩形の空間ともに Null 点が出現し，その出現位置や頻度は断面形状や周波数によって異なることが分かった。Ray-trace 法解析により実空間における Null 点の出現位置を予測できるかどうかを確認するため，図 5 の環境で電波強度を実測して解析結果と比較した。送信アンテナ（*Tx.*）および受信アンテナ（*Rx.*）の距離は 0.3 m から 3 m とし，0.03 m 刻みで受信アンテナを移動させ，全長 2.7 m の線上における受信電力分布の計測を行った。送信アンテナには RF 信号発生器（SMCV100B／ROHDE & SCHWARZ 社製）を接続して 920 MHz の正弦波を出力した。受信アンテナにはスペクトラムアナライザ（N9010A／Agilent Technologies 社製）を接続して計測を行った。図 7 に解析結果と測定結果を示す。両者を比較すると，Ray-trace 法の解析結果における Null 点出現位置および測定結果における受信電力の低下位置は，受信電力レベルに差は見られるものの概ね一致していた。この結果からマルチパス環境における幾何的な反射経路に基づく Null 点の発生位置を解析により予測できる可能性があると考えられる。

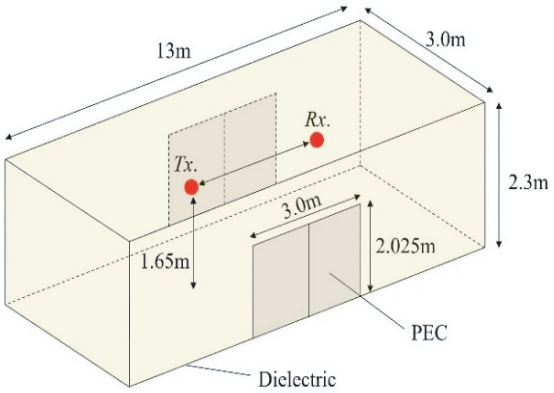


図 5　矩形断面の狭所空間の解析モデル

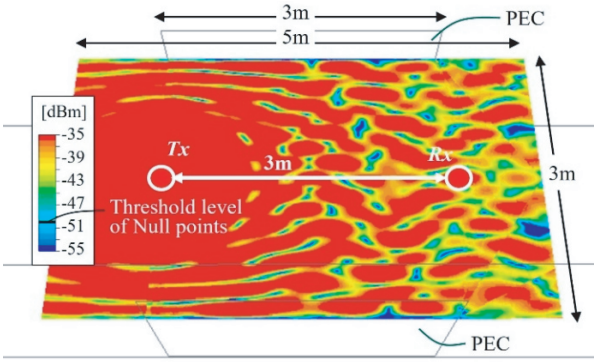


図 6　受信電力分布の解析結果

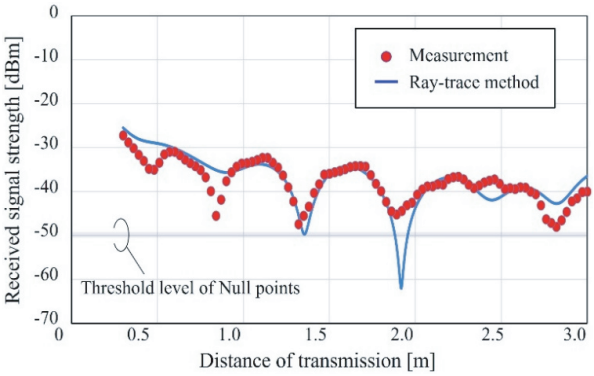


図 7　*Tx-Rx* 間の受信電力の解析および実測結果

4. まとめ

本稿では，下水管内を対象とした 11 ah の電波伝搬特性解析によって Null 点を予測することを目的として，まず断面形状が円形および矩形の狭所空間における電波伝搬解析を行った。結果より断面形状の違いによって Null 点の出現位置が変化する事や，解析周波数を 11 ah で用いられる 920 MHz，および従来の Wi-Fi で用いられる 2.4 GHz 帯（IEEE 802.11n），5 GHz 帯（IEEE 802.11ac 等）とした場合，周波数の違いによって Null 点の出現頻度が変化する事が確認できた。次に，矩形断面の空間において，RF 信号発生器とスペクトラムアナライザを用いた計測を行った結果，受信電力の低下位置は，シミュレーションによる Null 点の出現位置と概ね一致することが分かった。このことから，シミュレーションによって実空間に存在する Null 点の位置を推定できる可能性が示唆された。

本稿で示した結果は特定の環境や条件で実施したケーススタディであり，どのような条件でも解析により Null 点の位置が正確に予測できることを実証するには至っていない。今後は条件を変えて解析と実測の結果を積み重ね，解析による Null 点出現位置の予測精度の検証，さらにマルチパス環境における 11 ah のスループットを明らかにすることが課題である。

参考文献

1）https://www.11ahpc.org/11ah/index.html（802.11ah 推進協議会）
2）佐藤，他“NEDO 次世代空モビリティの社会実装に向けた実現プロジェクト「制約環境下におけるドローンの性能評価法の研究開発」のビジョン”，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2A2-C12, 2022.
3）山田，他“狭隘空間における小型ドローンの飛行制御性能の評価手法の開発，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2A2-C12, 2022.
4）総務省 https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/
5）三浦，他“目視外ドローン運航のための 169 MHz 帯マルチホップコマンド・テレメトリ通信実験”，電子情報通信学会技術研究報告，vol. 121, no. 25, RCC2021-17, pp. 89-94, 2021.
6）三浦，他“目視外飛行するドローンをつなぐ無線技術”，IEICE Fundamentals Review, vol. 15, no. 3, pp. 199-208, 2021.
7）藤生，行方，“管路の維持管理に関する研究”，下水道関係調査研究年次報告書集，pp. 51-58, 2003.
8）川上“ユビキタスコンピューティング時代における無線 LAN のアンテナ技術”，情報処理，vol. 44, no. 2, pp. 175-183, 2003.
9）福澤，他“水力発電所水圧鉄管内部の無線通信実験について”，日本ロボット学会誌，vol. 31, no. 7, pp. 703-7011, 2013.
10）西田，他“地下鉄トンネルの電波伝搬におけるトンネル内構造物の影響”，電子情報通信学会技術研究報告，vol. 117, no. 382, AP2017-157, pp. 37-42, 2018.
11）石原，他“下水管路検査用浮流型無線ネットワークカメラシステムの実現技術”，情報処理学会研究報告，vol. EIP-78, no. 4, pp. 1-8, 2017.
12）今井“Ray-Trace 法を用いたトンネル内伝搬特性の推定”，電子情報通信学会論文誌（B），vol. J85-B, no. 2, pp. 216-226, 2002.

Evaluation Of IEEE 802.11ah Rerating To Electro-magnetic Wave Transmission With Multi-pass Environments

T.Watanabe, D.Inoue, Y.irino and Y.Hada

IEEE 802.11ah is a kind of LPWA（Low-Power Wide-Area）and is Wi-Fi compliant. Taking advantage of characteristics of low power and long-distance transmission of 11 ah, many applications are considered for IoT, including communication method for drones. In recent years, drones are expected to inspect sewer pipes and patrol water tunnels under construction, which are difficult for people to enter. However, narrow spaces such as sewer pipes are known to be “multipath environments”, where radio waves are repeatedly reflected, and communication becomes unstable due to emergence of null points in multipath environments. To avoid wireless communication problems in multipath environments, it is effective to predict locations of null points by the radio wave propagation simulation. In this paper, we report on the simulation of radio wave propagation characteristics of IEEE 802.11ah in a multipath environment, and the possibility of predicting the location of null points by comparing the simulation results with actual measurements.