

UAVを用いたアマチュア無線用 HF 帯モノポールアンテナ 近傍界の電磁界計測の基礎研究

M2022SC004 伊藤恒輝

指導教員：藤井勝之

1 はじめに

近年, UAV(無人航空機: Unmanned Aerial Vehicle)の技術が発展し, 様々な用途で利用されている. これは通信の分野も例外ではなく, UAV を応用した研究として UAV を用いたアンテナ測定の研究報告例[1]がある. しかし, この研究報告例では UAV と測定機器が通信を行う専用機器や鉄塔を設置する測定環境が必要であり, 誰でも行うことができるアンテナ測定ではない.

また従来の屋外で遠方界を計測するシステムの一例として NSI-MI Technologies 社が開発している Outdoor Far-field 測定システム[2]等がある. 導入には高額な測定器と広大な敷地が必要であり, 一般のアマチュア無線技士が手軽に利用できるものではない.

HF 帯アンテナの一例として実効高が 2.5-25m オーダとなる HF 帯モノポールアンテナが挙げられる. このアンテナはアマチュア無線用アンテナとしてアマチュア無線技士が利用している. アマチュア無線技士はアンテナを自作して運用することを通じて実践的に作製したアンテナの点検や測定を行う. アンテナの特性を測定するには電波暗室やオープンサイトを利用する必要があるが, 工事費と電波暗室本体の設計費が約 7 億円を超える. アマチュア無線技士個人レベルで上記のデータを交換する専用装置や巨大な電波暗室を構築することはやはりコスト的に困難であると考えられる.

そこで本研究では高額な測定設備を有していないアマチュア無線技士でも HF 帯モノポールアンテナの放射指向性の計測ができる環境構築を目指す. 研究内容として図 1 のように近傍界領域で HF 帯モノポールアンテナを送信アンテナとし, UAV に搭載したアンテナで受信する. 近傍界領域で測定を行う理由としては HF 帯モノポールアンテナではアンテナ寸法と波長の条件により遠方界領域が 30-300m となり, 我が国の狭小な国土で測定環境を確保することが困難になるからである. 測定した結果をシミュレーションで計算した結果と比較し, UAV を用いた HF 帯モノポールアンテナ近傍界の電磁界計測の有効性を検討する.

本研究では測定するアマチュア無線用 HF 帯モノポールアンテナ近傍界での電磁界分布を FDTD(時間領域差分: Finite Difference Time Domain)法で算出し, UAV の存在が電磁界分布に及ぼす影響について検討した. また, FDTD 法で算出したシミュレーション結果の妥当性を証

明するために実測を行い, シミュレーション結果と比較を行った. さらに, 本研究の条件下における近傍界で測定した結果を放射パターンの結果に変換するための測定法の提案を行った.

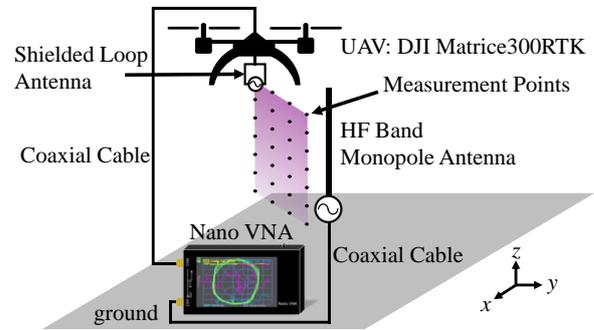


図 1 HF 帯モノポールアンテナの放射パターン計測

2 シミュレーションモデルの構築

2.1 UAV の 3D モデル

使用する UAV は DJI 社の Matrice300RTK[3]であり, 寸法が 0.81m×0.67m×0.43m, 最大積載量 2.7kg, 最大飛行時間 55 分である. FDTD 法による数値解析を行うための解析モデルとして TURBOSQUID 社の DJI Matrice300RTK ドローン 3D 解析モデル[4]を利用した. 解析モデルは材質が設定されていないため, 材質と電気定数[5]を設定した.

2.2 UAV を用いた HF 帯モノポールアンテナの近傍界シミュレーション

シミュレーションには Remcom 社の XFDTD(ver.7.9.2.3)を使用した. HF 帯モノポールアンテナは第 3 級アマチュア無線で利用できる周波数である 3.5, 7, 18.1MHz で送信可能となるようにアンテナ素子の長さを 21.4, 10.7, 4.1m に変更した. 受信アンテナには軽量で HF 帯の送信周波数を受信可能であるアンテナとしてセミリッドケーブル(SC-119/50)と銅線をはんだ付けすることで作製できるシールドドロープアンテナ[6]を利用した. 直径は 0.01m であるが FDTD 法では曲線の解析時間が長くなるため, 受信面積が等しくなる 1 辺 0.009m の正方形に形状を変更した.

シミュレーションの構成は高さによって変化する HF 帯モノポールアンテナ近傍界における磁界分布の結果を得るために, 図 2 のように ground から 0.2m 離れた点から 4m までの各 0.2m ずつ 20 点でシミュレーションを行った.

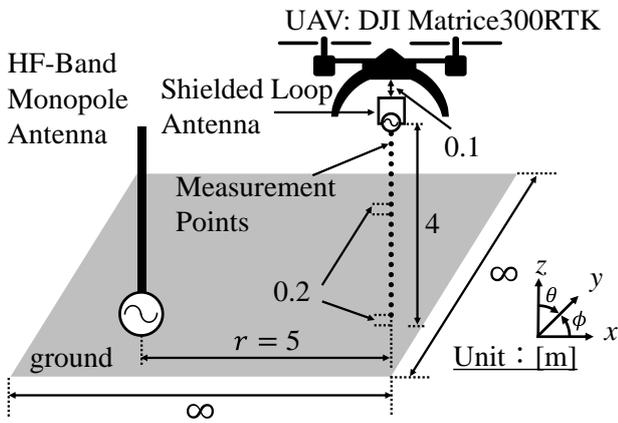


図2 シミュレーション構成

アンテナ間の距離 r [m]は HF 帯モノポールアンテナの寸法を D [m]としたとき 3.5, 7, 18.1MHz の波長 λ_0 [m]が約 85.7, 42.9, 16.6m となるため、 $D < \lambda_0$ での遠方界領域の条件[7]により

$$r > 3\lambda_0 \quad (1)$$

となる。よって遠方界領域は約 257.1, 128.6, 49.7m 必要となるが測定環境を確保することが難しいため、アンテナ間の距離は近傍界領域である 5m とした。また UAV に搭載するシールドドームアンテナの場所はシールドドームアンテナの柄の長さが約 0.13m なので UAV の底とシールドドームアンテナの給電部間の距離が 0.1m となる場所に設置した。HF 帯モノポールアンテナは完全導体の無限地板に接地した。

3 UAV の存在が電磁界分布に及ぼす影響

高さによって変化する HF 帯モノポールアンテナ近傍界における磁界分布の 3.5, 7, 18.1MHz におけるシミュレーション結果を図 3 に示す。UAV が存在するときの磁界分布の変化を示すために、送信アンテナが 18.1MHz で送信可能で UAV が高さ 3m に存在するときのシミュレーション結果を図 4 に示す。UAV を設置したシミュレーション結果を w/ UAV, UAV を設置していないシミュレーション結果を w/o UAV として比較を行った。

高さによって変化する HF 帯モノポールアンテナ近傍界における磁界分布の w/ UAV と w/o UAV の最大誤差は 3.5MHz では UAV の高さが 0.2m のとき 0.12dB, 7MHz では UAV の高さが 4m のとき 0.16dB, 18.1MHz では UAV の高さが 3.8m のとき 0.19dB となった。シミュレーション結果から UAV が HF 帯モノポールアンテナの電磁界分布に及ぼす影響は 0.2dB 以内であることが確認できた[8][9]。

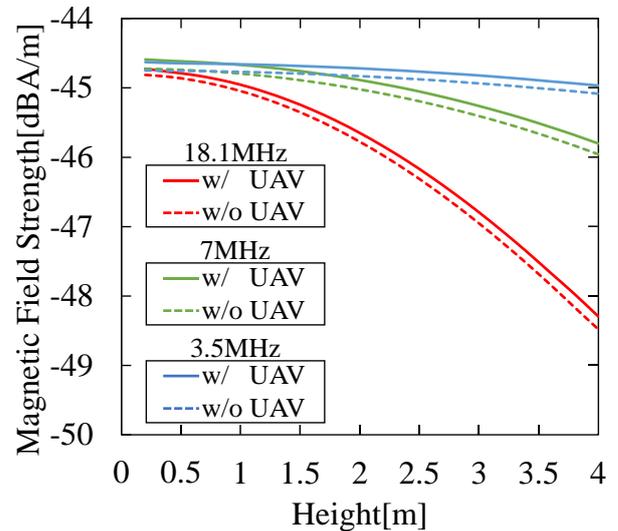


図3 各周波数における高さによって変化する磁界分布のシミュレーション結果

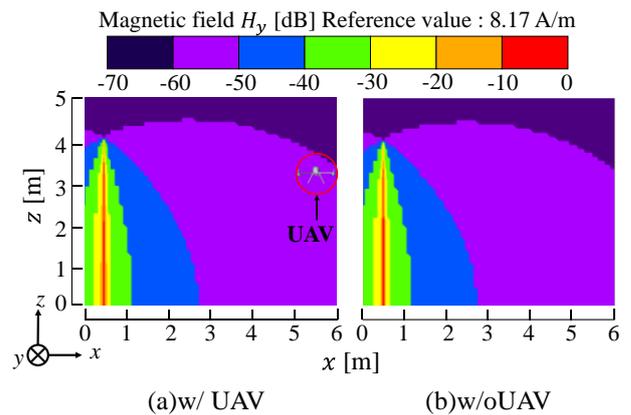


図4 18.1MHz における高さ 3m に UAV が存在するときの磁界強度分布の変化

4 シミュレーション結果の妥当性

3 節において示したシミュレーション結果の妥当性を証明するために図 5 に示す方法で実測を行った。

4.1 実測方法

シミュレーションでは 3.5, 7, 18.1MHz で計算を行ったが、3.5, 7MHz ではアンテナ素子の長さが 21.4, 10.7m となり、モノポールアンテナを作製することが困難である。そのため 18.1MHz でアンテナ素子の長さが 4.1m となるモノポールアンテナで実測を行った。モノポールアンテナの送信には ICOM 社の IC-705 を使用し、送信電力は 5W とした。

18.1MHz における w/o UAV のシミュレーション結果と比較するために ground から 0.2m 離れた点から 4m までの各 0.2m ずつ 20 点の位置にシールドドームアンテナを配置できる治具を作製した。シールドドームアンテナの受信には ROHDE&SCHWARZ 社の R&S@Spectrum Rider FPH ハンドヘルド・スペクトラム・アナライザを使用し、振幅を測定した。

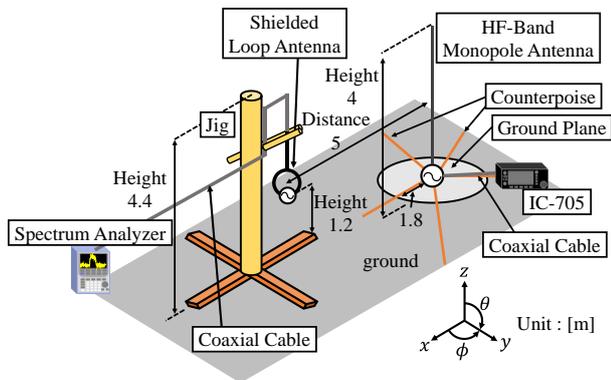


図5 電磁界分布の測定概要

4.2 HF 帯モノポールアンテナ近傍界での電磁界分布の実測結果

実測結果とシミュレーション結果を比較した結果を図6に示す。シミュレーションではHF帯モノポールアンテナの磁界強度を計算したが、実測で用いたスペクトルアナライザでは振幅のみの測定となる。そのため、シミュレーションで得た磁界強度の最大値で規格化した結果と、実測で得た振幅の最大値で規格化した結果を比較し、受信結果の傾向を確認した。

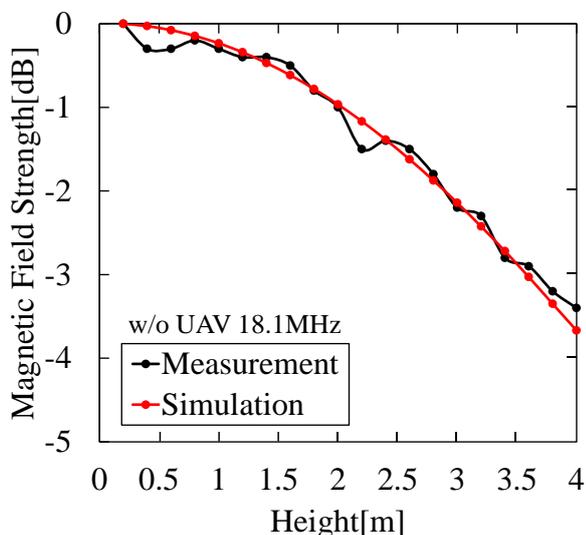


図6 実測結果とシミュレーション結果の比較

実測結果とシミュレーション結果ではシールドドローブアンテナの高さが上がるにつれて受信結果が小さくなる傾向を得ることができた。受信結果の最小値はシールドドローブアンテナの高さが4mの時であり、実測では-3.33dB、シミュレーションでは-3.67dBとなった。実測結果とシミュレーション結果との最大誤差は高さ2.2mの時に0.33dBであった。

誤差要因として、実測場所での不要な電波を受信した可能性や、風の影響でアンテナ素子が揺れ、送信波が乱れた可能性が挙げられる。また、高さが上がるにつれてシールドドローブアンテナに接続する同軸ケーブル

の影響が顕著に表れたため、同軸ケーブルの取り回しも誤差要因として考えられる。

よって実測結果からシミュレーション結果との誤差が0.33dBとなり、受信結果の傾向はシミュレーション結果と一致したため、シミュレーション結果の妥当性を証明することができた。

5 本研究における近傍界/遠方界変換の測定法の提案

HF帯モノポールアンテナの遠方界領域は式1より約257.1, 128.6, 49.7m必要となる。そのため、本研究では近傍界領域で測定を行い、受信結果から近傍界/遠方界変換を計算し、放射パターンを計測する。

近傍界測定ではアンテナ近傍で受信アンテナを平面、円柱、球体のいずれかの表面上で走査し、電界または磁界の振幅と位相の受信結果を測定する[7]。本研究では測定点の数が球体や円柱よりも最小であり、解析が比較的容易である直角平面走査近傍界測定法で測定を行う。

送信アンテナにはHF帯モノポールアンテナ、受信アンテナにはシールドドローブアンテナを利用するため、直角平面走査近傍界測定法のアンテナ配置は図7のようになる。HF帯モノポールアンテナは完全導体の無限地板に接地するため、測定面はx方向の正の部分のみとなる。

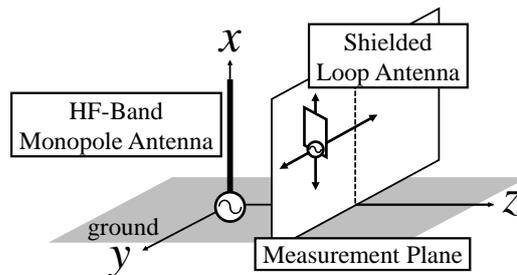
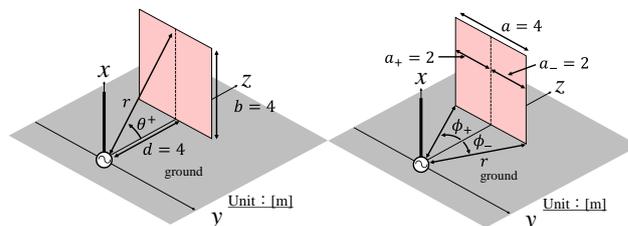


図7 本研究における送受信アンテナの配置

測定面の位置、高さ、幅は図8のようにする。測定面と送信アンテナ間の距離 d [m]は測定面の高さ b [m]、幅 a [m]以下にする必要がある[10]。高さ4mまで測定できる治具を測定で利用するため、測定面の高さを4mとし、測定面の幅を4m、測定面と送受信アンテナ間の距離も4mとした。



(a)測定面の位置と高さ (b)測定面の位置と幅
図8 送信アンテナと測定面の配置

本研究の条件下における垂直方向の放射パターンが計測できる角度 θ_{\pm} [°]は測定面が x 方向の正の部分のみとなるため、 θ_{-} [°]は 0° となる。 θ_{+} [°]は

$$\theta_{+} = \tan^{-1} \frac{b}{d} \quad (2a)$$

から求めることができ、 45° になる。よって、垂直方向の放射パターンが計測できる角度 θ [°]の範囲は $0^{\circ} \leq \theta \leq 45^{\circ}$ となる。水平方向の放射パターンが計測できる範囲の角度 ϕ_{\pm} [°]は

$$\phi_{\pm} = \tan^{-1} \frac{a_{\pm}}{d} \quad (2b)$$

から求めることができ、約 $\pm 26.6^{\circ}$ になる。よって、水平方向の放射パターンが計測できる角度 ϕ [°]の範囲は $-26.6^{\circ} \leq \phi \leq 26.6^{\circ}$ となる。

測定点の位置は図9のようにする。18.1MHzの電磁波で実測を行う際、測定点と測定点の間隔 Δx [m]、 Δy [m]はサンプリング定理[11]より

$$\Delta x, \Delta y \leq \frac{1}{2} \lambda \quad (3)$$

という条件があるため、本研究では作製した治具が測定でき、式3を満たす間隔として0.8mとする。測定点の数は合計36個になる。

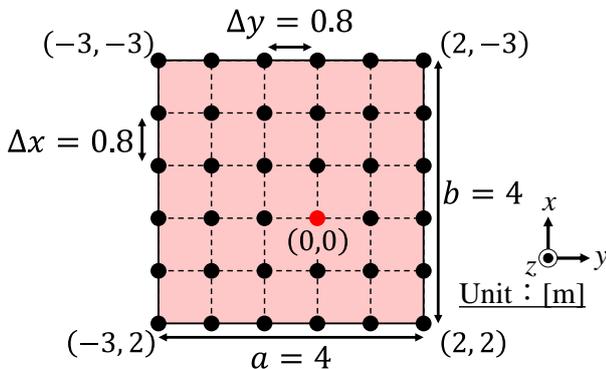


図9 本研究における測定点の位置

測定点における磁界の振幅と位相の受信結果と波数ベクトル \mathbf{k} 、位置ベクトル \mathbf{r} を求めることでHF帯モノポールアンテナの放射パターンを求めることができる。

6 まとめと今後について

本研究では電磁界測定用 UAV の存在が HF 帯モノポールアンテナ近傍界の電磁界分布に及ぼす影響を FDTD 法を用いたシミュレーションで算出し、シミュレーション結果の妥当性を証明するために実測を行った。また本研究の条件下における近傍界/遠方界変換の測定方法を提案した。

シミュレーション結果では計測を行う予定の DJI Matrice300RTK が電磁界分布へ及ぼす影響は0.2dB以内であることが確認できた。実測ではシミュレーション結果の傾向と一致し、誤差は0.33dBであった。よって、実

測結果からシミュレーション結果の妥当性を証明した。近傍界測定法では本研究の条件下における直角平面走査近傍界測定法の条件から、測定面の大きさや測定点間の間隔を提案した。今後の課題として、受信アンテナで近傍界/遠方界変換に必要な位相が正しく受信できるのかを確認し、UAV に受信アンテナを搭載した実測からアマチュア無線技士でも HF 帯モノポールアンテナの放射指向性を計測できる環境を目指す。

参考文献

- [1] 大倉 拓也, 辻 宏之, 川端 雄平, 新井 宏之, “ドローン搭載用短波帯アンテナシステムに関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.119, no.122, pp.31-34, July 2019.
- [2] NSI-MI Technologies, “Outdoor Far-Field,” NSI-MI Technologies, <https://www.nsi-mi.com/products/system-solutions/far-field-systems/outdoor-far-field>, 参照 May 10 2021.
- [3] DJI, “MATRICE 300RTK スペック,” DJI, <https://www.dji.com/jp/matrice-300/specs>, 参照 Jan. 19 2023.
- [4] TURBOSQUID, “DJI Matrice300RTK ドローン 3D モデル,” TURBOSQUID, <https://www.turbosquid.com/ja/3d-models/dji-matrice-300-rtk-3d-model-1576657>, 参照 Apr. 12 2022.
- [5] William H. Hayt, Jr, John A. Buck, “APPENDIX C Material Constants,” ENGINEERING ELECTROMAGNETICS, pp.566-568, Mc Graw Hill Education, New York, 2017.
- [6] アンテナ工学ハンドブック(第2版), (社)電子情報通信学会, オーム社, 東京, 2008.
- [7] 石井望, “アンテナの界領域,” アンテナ基本測定法, pp.33-36, コロナ社, 東京, 2011.
- [8] Koki Ito, Katsuyuki Fujii, Yasuyuki Okumura, Masahiro Umehira, “Effect of Unmanned Aerial Vehicles for Electromagnetic Field Measurement on Near Field of High-frequency-Band Monopole Antennas,” 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Oct. 2023. DOI:10.1109/GCCE59613.2023.10315654
- [9] 伊藤 恒輝, 藤井 勝之, 奥村 康行, 梅比良 正弘, “電磁界測定用 UAV の存在が HF 帯モノポールアンテナ近傍界に及ぼす影響,” 映情学技報, vol. 47, no. 5, pp. 17-20, Feb. 2023.
- [10] IEEE, “IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements,” IEEE Std., Dec. 2012. DOI :10.1109/IEEESTD.2012.6375745
- [11] Constantine A. Balanis, ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2016.