

FMCWによる測距機能を備えたHFドップラー観測システムと、観測事例の紹介

#並木 紀子¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, 野崎 憲朗¹⁾, 中田 裕之²⁾, 坂井 純¹⁾, 富澤 一郎¹⁾, 有澤 豊志¹⁾

¹⁾ 電気通信大学, ²⁾ 千葉大学, ³⁾ 電通大, ⁴⁾ 千葉大・工

An HF Doppler Observation System with FMCW-Based Ranging Capabilities: System Design and preliminary observations

#Noriko Namiki¹⁾, Keisuke Hosokawa¹⁾, Kenro Nozaki¹⁾, Hiroyuki Nakata²⁾, Jun Sakai¹⁾, Ichiro Tomizawa¹⁾, Toyoshi Arisawa¹⁾

¹⁾The University of Electro-Communications, ²⁾Chiba University, ³⁾The University of Electro-Communications,

⁴⁾Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Chiba University

The HF Doppler (HFD) observation system is one of the ionospheric remote sensing techniques that utilizes the reflection of HF radio waves at the ionospheric E and F regions. The ionosphere exhibits various kinds of variations due to energy inflows from the Sun, the Earth's magnetosphere, or from the ground, causing frequency changes, i.e., Doppler shifts, in the reflected waves. These Doppler shifts can be used to visualize the vertical/horizontal movements of the ionosphere phenomena. The HFD observation is considered to be suitable for remote sensing of the lower ionosphere.

One of the HFD observation systems in Japan is based on the experimental station JG2XA, operated by a group at the University of Electro-Communications since 2001. An overview of the HFD project and measurement data is available at "<http://gwave.cei.uec.ac.jp/hfd/>". This HFD observation system includes 11 receiving stations across Japan, and by combining data from multiple receiving stations and frequencies, the distribution and temporal variations of plasma in the lower ionosphere over Japan have been analyzed. For a long time, information from the conventional HFD system (i.e., the Doppler shift data) alone was insufficient to determine the altitude/location of the ionospheric phenomena. As a result, there has been a demand for a function to measure the distance to the reflection points. To fulfill the need for ionospheric distance observations, we have implemented an HFD observation system with ranging capability by transmitting a signal that combines an FMCW signal, which sweeps the frequency band centered on the single transmission frequencies of 5.006 MHz and 8.006 MHz, with the original single-frequency signal. Since 2024, we have been conducting continuous pilot observations in the Kanto area using this system. To achieve FMCW-based ranging at remote locations, we utilized synchronized signals based on 10 MHz and 1 pps from GNSS. Additionally, for heterodyne detection at receiving points, we adopted the same model of function generator as the transmitter and a physical mixer as the local signal source, confirming that the desired distance information can be obtained from the difference in frequency. Along with the development of the FMCW receiver, we also developed a plotting code. Although challenges remain in terms of data storage capacity and the processing load for plotting data due to the higher sampling rate compared to conventional HFD observation data, we successfully visualized high-resolution reflection altitude data using Python.

At the 2023 conference, since the FMCW transmission system was still under development, the demonstration was limited to the theoretical validation of distance measurement using the conventional system. The actual observation of radio wave propagation in physical space and the ability to measure real phenomena remained unknown. In this presentation, we will introduce the design of the FMCW ranging-enabled HFD transmission and reception system currently in operation, and show several characteristic observations of ionospheric E and F region reflections obtained with high spatial and temporal resolution, on the order of several kilometers.

短波ドップラー (HF Doppler: HFD) 観測システムは、地上から送信された短波帯の電波が電離圏 E、F 領域反射される性質を利用して、電離圏の擾乱現象をリモートセンシングする手法である。電離圏には、太陽や地球磁気圏、または地上からのエネルギー流入によって、電子密度の変動が絶えず生じており、地上からの送信電波に周波数の変化、すなわちドップラーシフトを印可する。このドップラーシフトによって、電離圏擾乱現象の鉛直運動、水平運動などを観測することができる。HFD 観測システムは、特に、電離圏下部の遠隔観測に適しているとされている。

日本における HFD 観測システムの一つとして、電気通信大学のグループが 2001 年から運用を行っている実験局 JG2XA を用いたネットワーク観測がある。HFD プロジェクトの概要と測定データは "<http://gwave.cei.uec.ac.jp/hfd/>" において公開されている。この HFD 観測システムは、日本国内に受信点が 11 カ所設置されており、複数受信点、複数周波数のデータを組み合わせることによって、電離圏下部に発生する擾乱現象の時空間変動が解析されている。しかし、これまで観測してきたドップラーシフトの空間変化や時間変化のみでは、物理現象の発生高度・領域を特定するための情報が不足しているため、反射点の距離測定機能が求められてきた。電離圏距離観測の要望を実現するために、実験局で取り扱う単一の送信周波数 5.006 MHz および 8.006 MHz を中心とした周波数帯域を掃引する FMCW 方式の信号と、元の単一周波数信号を合成して送信する方法で、測距機能を備えた HFD 観測システムを実現し、2024 年から試験的に関東近隣で継続的な試験観測を続けている。遠隔地点での FMCW 方式による測距を実現させるために、GPS の 10 MHz と 1 pps による同期信号を利用している。加えて、受信点でのヘテロダイン検波のため、現段階ではローカル信号として送信機と同じ型番のファンクションジェネレータとダブルバランスドミキサーを採用し、差周波から目的とする距離情報を得

られることが確認できている。FMCW 方式受信機の開発と共に、データプロット用プログラムの開発にも取り組み、従来の HFD 観測データと比較してサンプリングレートが高いため、保存容量の圧迫やグラフ化処理の重さが課題であるものの、Python を利用して高精度データの可視化に成功した。

2023 年の講演会では、FMCW 方式の送信システムはまだ開発途中であったため、従来システムによる測距理論の実証までにとどまり、実空間を伝搬した電波がどのように観測できるかは確認できていなかった。今回の発表では、現在実際に稼働している FMCW 測距機能を備えた HFD 送受信システムの仕組みを紹介し、数 km の高い距離分解能および時間分解能によって得られた、実測による電離圏 E、F 領域反射のいくつかの特徴的な見え方を紹介する。