

低電子密度領域におけるインピーダンス・プローブ計測の高精度化に関する研究

若林 誠 [1]; 小野 高幸 [2]; 鈴木 朋憲 [3]

[1] 新居浜高専 電気情報工学科; [2] 東北大・理; [3] 東北大・理・地球物理

Accurate electron density measurement by impedance probe in low-density region of ionosphere

Makoto Wakabayashi[1]; Takayuki Ono[2]; Tomonori Suzuki[3]

[1] Niihama-N.C.T.; [2] Department of Astronomy and Geophysics, Tohoku Univ.; [3] Dep. of Geophys, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

The impedance probe has been used for over 40 years, to obtain the absolute value of electron density in space plasma with high accuracy (Oya, 1966). In association with two campaign observations, in-situ measurements of electron density by using impedance probe have been successfully carried out. Moreover, a phase detection type impedance probe method has been developed to realize a continuous observation of the plasma density.

In the previous instrumentation for the in-situ observations such as SEEK-2 in 2002 and DELTA in 2004 (namely, ordinary type impedance probe), the impedance probe showed an observation limit that it could not detect the fine structure of plasma irregularity due to the plasma instabilities. Detection of fine structure of the plasma density becomes very much important to understand the physical processes generated in the ionosphere. So, accurate observation of fine structure of plasma distribution with absolute value is essential to study the electro-dynamics in the ionosphere.

We tried to develop the phase detection type impedance probe by using PLL (Phase Locked Loop) method. The methodology of phase detection type was confirmed in laboratory and space science chamber. Based on these experiments, we clarified that it was possible to detect the phase shift at UHR and SHR frequencies. However, in the space chamber experiment, the phase shift showed difference from the simulation results by using LC resonant circuit in the laboratory experiment. Also the results of simulation by using the Micro-Cap V CQ suggested that this difference seemed to be due to the collision effect in space chamber. Quantitative evaluation about the collision effect should be examined in future works. Finally, we achieved to make the continuous detection of UHR frequency by using the PLL operation. In comparison with the ordinary type impedance probe, it was shown that the locked frequency changed in correspondence with the electron density variation inside the space chamber. The UHR frequency indicated by phase detection mode showed lower value (11 % at most) than the UHR detected by the swept frequency mode. It is also needed to evaluate the time resolution of UHR frequency for development works in the near future. As it has been discussed in this thesis, further extended physical quantities of space plasma are possible to be measured by using the method of the impedance probe.

本研究は、宇宙空間におけるプラズマ密度計測に用いられてきたインピーダンス・プローブの時間分解能および精度を向上させ、地球電離圏における電子密度構造を特に低密度領域において詳細に検出することを目的とする。本研究によって、中緯度域 sporadic-E 層 (Es 層) に付随した、低密度領域の構造が明らかになり、多層構造を持った Es 層の存在下における電離圏電子密度構造に対してより詳細な描像を得ることができる。

インピーダンス・プローブの誤差要因としては、「(1) 発振器における周波数ステップ数と、掃引時間の兼ね合い」「(2) プラズマ-中性粒子間の衝突によるダンピング」の 2 点が挙げられる。本研究を遂行する上では「位相検波」の手法を用いることで、これらの点を改善する。

インピーダンス・プローブは Oya [1966] によって開発された、電子密度の絶対値を 3 % の高精度 (電子密度 10^4cm^{-3} 以上の領域) で直接観測可能な観測装置である。この装置は、プラズマ中に伸展した導体プローブに高周波電界を印加し、その等価容量を広帯域にわたって計測することで、周辺プラズマの UHR 周波数を決定し、電子密度の絶対値を得る。この観測手法はプローブの等価容量を 1pF のオーダーで精密に測定する必要があるが、回路にコンデンサー・ブリッジを採用する事で回路内部の浮遊容量の影響をキャンセルし、高精度な観測を実現している。

従来はブリッジ回路の出力振幅極小値をもって UHR 周波数を検出していた。しかしながら、この極小値付近の波形はプラズマ-中性粒子間の衝突が卓越する高度領域 (高度 100km 以下) では平坦に近く (いわゆる Q 値が低く) なり、またこの高度領域は特に UHR 周波数も 2MHz 程度と低いため、誤差が大きくなる。衝突周波数が低い領域でも、DDS の周波数ステップが現状では 10kHz 刻みであるため、UHR 周波数が低ければ誤差が必然的に大きくなる。もちろん、DDS の周波数ステップを細かくすれば精度は向上するものの、1 掃引に時間がかかり、時間分解能が落ちる。

そこで、本研究では「位相検波」を導入する。回路シミュレータを用いて、ブリッジ回路の出力波形の振幅及び位相 (入力信号に対する位相差) を計算すると、「UHR 周波数で位相差が 90 度」になることがわかる。位相差は UHR 周波数付近で 0 ~ 180 度を連続的に横切るため、仮に DDS の周波数ステップが 10kHz 刻みであっても、回路に十分な S/N 比が確保できれば数 kHz の誤差で UHR 周波数が決定できる。これによって、UHR 周波数が 2MHz 程度の領域においても、10% 以下の高精度が期待でき、また DDS による周波数掃引範囲を UHR 周波数付近に限定することで、時間分解能も向上する。現在は 300k ~ 10MHz を 500ms で掃引しているため、例えば 300kHz ~ 3MHz まで限定できれば 200ms 程度の高時間分解能が実現できる。

衝突周波数の卓越する領域においては、位相検波をした場合、数値計算で示される形状と異なってしまうことが、実験室プラズマ中（衝突周波数が高い状態）での実験で示されている。この状態はプローブ等価回路に抵抗を付加することで、回路シミュレータによって再現可能となる。そこで、衝突周波数（すなわち付加した抵抗値）と「位相のずれ」の関係を定量的に明らかにすれば、衝突周波数の卓越する領域（高度 100km 以下の領域）においても高精度観測が期待できる。