

次世代科学衛星搭載用広帯域3軸サーチコイルの開発

田中 諒 [1]; 八木谷 聡 [2]; 尾崎 光紀 [1]
[1] 金沢大・理工・電情; [2] 金沢大

Wideband Triaxial Search-coil Magnetometer for Next-generation Scientific Satellite

Ryo Tanaka[1]; Satoshi Yagitani[2]; Mitsunori Ozaki[1]
[1] Electrical and Computer Eng., Kanazawa Univ.; [2] Kanazawa Univ.

This study aims for development of a new wideband magnetometer for plasma wave observation by scientific satellites. Next-generation observation requires wideband and higher sensitivity of magnetometers. For instance, we will need a magnetometer with a sensitivity of $1 \text{ fT}/(\text{Hz})^{1/2}$ at 100 kHz for the detection of the Continuum Radiation, which has been observed only by an electric field antenna in the conventional observation. Also, we will need a magnetometer for magnetic field vector which gives the arrival direction of waves.

In this study, we have focused on search-coil type magnetometer. Traditional search-coils, which are mounted on many spacecraft for example GEOTAIL and BepiColombo/MMO, have been used for plasma wave observation below about 10 kHz. Here we have aimed to improvement of the observing frequency up to 10 times higher than their search-coils. The upper limit of the observable frequency depends on the inductance and the stray capacitance of the search-coil. For wideband search-coil, we should minimize both parameters. However, the inductance is not easy to be reduced because inductance directly relates with the detectable sensitivity. The stray capacitance, which depends on the physical conditions like the cable length between the coil and the preamplifier, also cannot be reduced easily. Thus, wider bandwidth of search-coils is very difficult because of the basic construction of search-coil.

On the other hand, BepiColombo/MMO has two kinds of search-coils for low(0.1 Hz - 20 kHz) and high(10 kHz – 640 kHz) frequency band. BepiColombo/MMO has one set of triaxial search-coil, which consists of two sensors for low frequency and one sensor for both low and high frequencies.

In this study, we have developed a new wideband search-coil, which is made by a specific structure. The specific structure is "variable inductance search-coil," which consists of only passive elements.

In this presentation, we will report on the structure and highly accurate theoretical model of our search-coil, and show the theoretical and measurement results of our prototype search-coil, which have the sensitivity of $1 \text{ fT}/(\text{Hz})^{1/2}$ at two frequencies, 100 kHz and 1 MHz. Additionally, we will discuss approximate search-coil model, which is distributed constant circuit, instead of the highly accurate but complicated model, which is lumped constant circuit.

本研究は、科学衛星によるプラズマ波動観測用の磁界センサの広帯域化を目的としている。次世代科学衛星によるプラズマ波動観測では、従来のセンサ特性よりもさらなる広帯域化、高感度化が求められている。例えば磁界センサに対しては、従来電界のみの観測が主流であった Continuum Radiation に対して、その磁界成分を観測するために、 $1 \text{ fT}/(\text{Hz})^{1/2}@100 \text{ kHz}$ 以下という高感度のセンサが求められており、また、波動の到来方向を得るために、磁界センサは3軸化が必要である。

本研究では、サーチコイルタイプの磁界センサを扱う。従来のサーチコイルは、例えば磁気圏尾部観測衛星「GEOTAIL」や水星探査衛星「BepiColombo/MMO」に搭載のもので、観測周波数の上限が約 10 kHz であり、本研究の目標を達成するにはこの周波数特性を約 10 倍以上改善しなければならない。サーチコイルの観測周波数の上限は、サーチコイル自身が持つインダクタンスと、センサのいたるところに存在する寄生容量の双方によって制限を受ける。そして、センサを広帯域化させるには、インダクタンスと寄生容量を共に小さくする必要がある。しかしながら、インダクタンスはセンサ利得と関係があり、低いインダクタンスは最小磁界検出感度の劣化に直結する。また、寄生容量の低下はセンサの磁界検出部と信号増幅器との距離など物理的な条件とのトレードオフとなる上、ゼロにするのは不可能である。すなわち、原理的に従来のサーチコイルの構成において広帯域化は非常に困難であり、サーチコイルに関連した電気的パラメータのみを調整して計測周波数を広げたとしても、それは磁界感度等を犠牲にした結果に過ぎず、本質的な広帯域化と言えるものにはならない。

このように広帯域化の困難なサーチコイルに対しても、「広帯域」であることにこだわらなければ、対象周波数の高低にかかわらず、磁界感度の向上は比較的容易に実現できる。その理由は、コイルの巻き数を変化させることによってサーチコイルのインダクタンスを自由に調整できるためである。例えば、興味のある「狭い」周波数帯が比較的 low 域に存在する場合、その周波数帯における感度を向上させたいならば、単にコイルの巻き数を増やし、インダクタンスを大きくすればよい。既に述べたとおり、大きなインダクタンスは計測周波数を低下させるが、low 域のみに興味がある現在、このことは問題にはならない。また、もし high 域のみに興味があるのなら、逆にインダクタンスを小さくすればよい。なぜなら、インダクタンスの低下によって発生する磁界感度劣化は、low 周波数帯での問題だからである。

以上のことを踏まえると、広帯域に及ぶ磁界信号をサーチコイルで検出するという本研究の目的は、異なる周波数帯を対象とした複数のセンサを用いるという極めて自然な方法によって解決するように思われる。実際、水星探査衛星「BepiColombo/MMO」搭載の3軸サーチコイルは、1軸分のみ高周波帯用(10 kHz ~ 640 kHz)に用いられ、様々な信号を検出することができるようになっている。しかしながら、各軸に対してそれぞれ別の役割(対象周波数)を持たせることは、本来の3軸の意味が損なわれるということでもある。また、それを嫌ってより多くのサーチコイルを用いると

というのは、積載量に限りのある人工衛星を対象とした本研究において、相応しい方法ではない。

今回我々は、サーチコイルの広帯域化に対し、サーチコイルに特殊な構造を組み込むことで実現できるということを示す。その基盤となるアイデアは、「サーチコイルのインダクタンスを都合のいいように周波数変化させられないか」というものである。特に本研究では、そのような「可変インダクタンスコイル」を、サーチコイルにキャパシタンス成分を積極的に付加することにより、受動素子のみで構成することに成功した。

本発表では、そのようなサーチコイルの一般的な構成や、その特性を極めて高い精度で説明することが可能な理論モデルを紹介し、また具体的な例として、実際に 100 kHz と 1 MHz という 10 倍離れた 2 つの周波数において同時に $1 \text{ fT}/(\text{Hz})^{1/2}$ 程度の感度を実現するサーチコイルについて、その理論解析結果と実測結果を報告する。また、ここで用いる理論モデルは分布定数回路に基づく複雑なものであるため、集中定数回路による近似モデル等についても、議論を行う。