

R006-70

Zoom meeting B : 11/4 PM2 (15:45-17:30)
16:30-16:45

波動粒子相互作用解析装置における粒子検出用高速応答回路の集積化に関する研究

#菊川 素如¹⁾, 小嶋 浩嗣¹⁾, 浅村 和史²⁾, 齋藤 義文³⁾

¹⁾京大・生存圏, ²⁾宇宙研, ³⁾宇宙研

Development of the High-Speed Current Detection Circuits in Particle Sensors Dedicated to Wave-Particle Interaction Analyzer

#Motoyuki Kikukawa¹⁾, Hirotsugu Kojima¹⁾, Kazushi Asamura²⁾, Yoshifumi Saito³⁾

¹⁾RISH, Kyoto Univ., ²⁾ISAS/JAXA, ³⁾ISAS

In the radiation belts, there are many high-energy particles. These particles can cause severe damage to spacecraft. Therefore, it is very important to understand their acceleration mechanism [Reeves et al., 2003]. The physical interaction between plasma waves and particles, which is considered to be the acceleration process of particles, is called "wave-particle interaction". However, it has been difficult to observe the wave-particle interaction. At present, we have only found a temporal correlation between trapped high energy particles and waves [Li et al., 2014]. This was due to the lack of temporal resolution and processing speed of conventional instruments, which prevented us from determining the energy conversion amount between waves and particles. Then, the concept of Wave-Particle Interaction Analyzer (WPIA) was proposed by Fukuhara et al. [2009]. The WPIA is designed to obtain the phase relationship between the velocity and wave vectors of each particle onboard a satellite, and it calculates the energy conversion amount directly. The WPIA was launched in 2016 as a trial installation on the Arase satellite in Japan, and is still in operation [Miyoshi et al. 2018]. However, the WPIA has some problems with respect to the physical scale of the system. Since wave-particle interaction is spatially and temporally localized and dynamically fluctuating phenomenon [Li et al., 2009], it is necessary to realize simultaneous multipoint observations by multiple small satellites to carry out accurate observations. However, satellites carrying WPIA is limited to mid-size or larger such as Arase satellite in Japan and MMS satellites in USA, and for this reason the simultaneous multi-point observation is not realistic in view of the necessary cost. Therefore, it is important to make the WPIA system small enough to be mounted on small satellites such as CubeSat [Nakaya et al].

The WPIA consists of particle observers, wave observers and the processing circuits that calculate energy conversion amount. Although it is necessary to miniaturize each part of the WPIA, we have tried to integrate the particle detection circuits inside the particle detectors that output the incoming signal of plasma particles. Since the number of detection circuits is the same as that of the particle sensors, the detection circuits are one of the largest components of the WPIA. For example, in the Arase satellite, there are 16 particle sensors to detect particles arriving from all directions, and the total size of the particle detection circuits is over 10 cm square. The subject of this study is to miniaturize and integrate the entire detection circuits on a 5 mm square chip. For integration, we will use application-specific integrated circuit (ASIC) technology, which enables us to realize a high-performance circuit specialized for a particular application.

The particle detection circuit should be able to detect one million arrivals per second. In this study, we designed three circuits: (1) a high-speed amplifier for particle detection, (2) a comparator and (3) a peak-hold circuit. In the high-speed amplifier for particle detection (1), weak current pulses generated by the particle sensor are amplified and converted into a voltage signal. The comparator (2) is used to distinguish noise from the incoming particle signal. The peak-hold circuit (3) is necessary to synchronize the reset timing of the incoming signal between 16 channels. Then we designed a prototype chip and measured it. A single detection circuit is less than 0.2 square millimeters, which makes it possible to fit 16 channels on a 5mm-square chip. The measurement results show that the rise delay time of the signal is about 30 ns and the response delay of the entire circuit is less than 50 ns at most. These results show that this circuit satisfies the prescribed conditions. In this presentation, we present the details of the WPIA system and the results of operational measurements.

地球近傍の宇宙空間には、MeV 以上の高エネルギー粒子の集まりである放射線帯が存在している。これらの粒子は航行する宇宙機へ深刻なダメージを与えうることから、その加速メカニズムの解明は工学的に重要な意味を持つ [Reeves et al., 2003]。粒子の加速過程として考えられているプラズマ波動・粒子間の物理的作用を広く"波動粒子相互作用"と呼ぶが、従来、これを観測的に捉え実証することは困難であった。目下、観測上の実績としては、捕捉された高エネルギー粒子と波動との間に時間的な相関があることを明らかにしたのみである [Li et al., 2014]。これは従来の観測器の時間分解能や処理速度が不足しており、波動・粒子間のエネルギー変換量を求めることができないことに原因があった。そこで、Fukuhara et al.[2009]により、波動粒子相互作用解析装置(WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer)のコンセプトが提案された。これは、人工衛星上で各粒子の速度ベクトルと波動ベクトルの位相関係を取得し、ここからエネルギー交換量を直接計算することを企図して設計されている。WPIA は 2016 年に打ち上げられた我が国の Arase 衛星へ試験的に搭載され、現在も観測を行っている [Miyoshi et al., 2018]。ところが、現用の WPIA には、そのシステムの物理的な規模に関して改善すべき課題が存在する。磁気圏中の粒子およびプラズマ波動は時空間的に局在しており、かつダイナミックに変動している [Li et al., 2009]ため、精確な観測を実施するには広範囲に投入された複数の小型衛星による同時多点観測を実現する必要がある。しかし、現状 WPIA を搭載しうる衛星は上述

した JAXA の Arase 衛星や NASA の MMS 衛星のような中型以上のものに限られ、それらを複数打ち上げることによる同時多点観測の実現は必要コストを鑑みると現実的ではない。したがって、CubeSat[Nakaya et al., 2003]等に代表される小型衛星に搭載可能なほど WPIA システムを小型化することが同時多点観測の実現のために重要であると考えられる。

WPIA は粒子観測器と波動観測器、およびそれらが取得したデータを処理する演算回路から成る。これらの各部分を小型化することが必要であるが、本研究が現在までにターゲットとして小型化を試みているのは、粒子観測器の内部にあってプラズマ粒子、とりわけ放射線帯電子の到来信号を逐次出力する粒子検出回路である。その機能上、粒子センサと同数の検出器が必要となり、WPIA の構成要素の中でも大規模なもの 1 つであった。例えば、Arase 衛星には全方向から到来する粒子を検出可能なように 16 個の粒子センサが搭載されており、それに伴う粒子検出回路の大きさは総体で 10 cm 四方を超える。本研究の目的は、この検出器の全体を 5 mm 四方の基板上に小型、集積化することにある。集積化には、専用の用途に特化した高性能な回路を実現することが可能な特定用途向け集積回路 (ASIC: Application Specific Integrated Circuit) 技術を用いる。

粒子検出回路には、1 秒間に 100 万個の粒子到来が検出可能であることが求められる。そこで、本研究では次に示す 3 つの回路、すなわち (1) 粒子検出用高速アンプ、(2) コンパレータ、(3) ピークホールド回路を設計し、試作チップの測定を行った。(1) は、粒子センサが発生する数百 μA の電流パルスを増幅した上で電圧信号に変換し、後段のコンパレータに接続する回路である。(2) のコンパレータによって雑音と粒子の到来信号とが峻別される。(3) の回路は、到来信号のリセットタイミングを 16 チャンネルの間で同期させるために必要となるものである。測定の結果、信号の立ち上がり遅延時間は高々 30 ns であり、回路全体の応答遅延時間も最大で 50 ns 以下であった。また、検出回路 1 チャンネルの専有面積は 0.2 平方ミリメートルに満たず、これは 16 チャンネルを 5 mm 角のワンチップに収納することも可能な大きさである。以上の結果はいずれも所定の条件を十分に満足するものであるといえる。

本発表では、この粒子検出回路システムの詳細と動作試験の測定結果を紹介する。また、WPIA システム全体の小型化に向けた今後の開発計画について述べる。