デルタ-シグマ変調方式ディジタル-アナログ変換器を用いた 高精度磁力計の開発

東海大学大学院 工学研究科 航空宇宙学専攻 高橋研究室 修士課程2年 宇宙科学研究本部 宇宙プラズマ研究系 松岡研究室 特別共同利用研究員 井口 恭介

SCOPE Scale COupling in the Plasma universE

5機の衛星による同時マルチスケール観測 目的 : 地球磁気圏のダイナミックな現象を理解 探査領域 : ショック、リコネクション、境界層 方法 : マルチスケール・同時多点観測

要求項目	要求值
計測範囲	±4096 nT
分解能	8 pT@20 bits
ノイズレベル	10 pT/√Hz
周波数応答	0 ~ 128 Hz
重量	550 g
電力	1 W

<u>DC磁場</u>

- ① 磁気圏の構造を捉え、磁気圏の背景場を知る
- ②磁場の方向を正確に測ることで分布関数の非等方性を知る

<u>0.1~数十Hzの磁場</u>

① イオンや電子の加速や加熱過程

サイクロトロン周波数付近の波や運動論的アルフベン波の波動粒子相互作用 衝撃波、境界層の遷移領域内部での磁場擾乱

② 電子の時間スケール(10 msec)で磁場を測定し、リコネクションが発生・発達 する機構を解明する

S310-40号機

- ・ スポラディックE層の観測を目的とした科学観測ロケット
- 磁場測定器への要求・・・ロケットの姿勢計測(地磁気姿勢角)







ディジタル方式 DACの分解能と入出力の関係



→ 変動しないはずのDC出力が変動する

DACの分解能が磁場の分解能と線形性を決定する

ディジタルアナログ変換器(DAC)



先行研究 DFGの課題:高分解能化と線形性

H. U. Auster et al, 2007 Space Sci. Rev. THEMIS 衛星搭載 ディジタル方式磁力計



12 ビット = 分解能 12 nT 放射線対策済(100 krad)DACは 12 ビットまで

課題: 線形性の保証





<u>研究の最終目的</u>

- ・ SCOPE搭載に向けた磁力計の開発を行う
- 要求からこれまでと同等以上の性能を目指す 分解能 8 pT/ビット (±4096 nT、20ビット) 線形性 0.005 %(=0.4 nT)

本研究での目的と内容

- 前段階として観測ロケットS310-40号機に開発した磁力計を搭載する 分解能 2 nT/ビット (±65536 nT、16ビット) 線形性 0.005 %(=6.6 nT)
- ディジタル方式フラックスゲート磁力計のDAC部にΔΣ変調方式を採用
 長所 新規DAC素子の開発が不要

原理的に高い線形性を確保ができる

ΔΣDACを用いたディジタル方式磁力計

DACデバイスを用いた場合の磁力計



11

ΔΣ変調DACを採用した磁力計











ダイナミックレンジ付近はノイズが大きい

15

定常磁場に対する応答の計算 結果



マイクロコンピュータのセッティングで計算を行った結果、 DACのノイズが約2 nT(16 ビット)に達した。

<u>研究の最終目的</u>

- ・ SCOPE搭載に向けた磁力計の開発を行う
- 要求からこれまでと同等以上の性能を目指す

<u>分解能 8 pT/ビット</u>(±4096 nT、20ビット)

線形性 0.005 %(=0.4 nT)

本研究での目的と内容

- 前段階として観測ロケットS310-40号機に開発した磁力計を搭載する <u>分解能 2 nT/ビット</u>(±65536 nT、16ビット) <u>線形性 0.005 %(=6.6 nT)</u>
- ディジタル方式フラックスゲート磁力計のDAC部にΔΣ変調方式を採用
 - 長所 新規DAC素子の開発が不要

原理的に高い線形性を確保ができる

設計から得られた成果

- ΔΣDACの設計パラメータを変えて、搭載デバイス(FPGA)に適したDAC
 設計を行った
- ・ その結果、ノイズを抑えて分解能 2nT をほぼ満足する結果を得た

PICによるDAC開発 ーディジタル部の構成ー

PIC Peripheral Interface Controller 小型・安価なマイクロコンピュータ





- アナログ出力のノイズ評価
 電圧分解能3 μV(0.7 nT相当)のADCでアナログ出力を測定
 → 設計計算よりノイズが大きい
- ・ 変調出力のスペクトルを評価
 FFTアナライザで変調出力を測定し、設計計算と比較
 → 設計結果と同様のスペクトル





- ・ 縦軸はdBVrms²
- 1 kHz以上の周波数では測定値と設計計算は近い値を得た
- 低周波では数dB異なる



・1kHz以上の周波数では設計計算と測定値が異なる FFTアナライザのADCが16ビットなので約100dBの範囲で測定できる

<u>まとめ</u>

<u>研究の最終目的</u>	本研究での目的と内容
・ SCOPE搭載磁力計の開発	 S310-40号機搭載磁力計の開発
<mark>分解能 8 pT/ビット</mark> (±4096 nT、20ビット)	<mark>分解能 2 nT/ビット</mark> (±65536 nT、16ビット)
線形性 0.005 %(=0.4 nT)	線形性 0.005 %(=6.6 nT)

<u>設計から得られた成果</u>

- ・ ΔΣDACの設計パラメータを変えて、搭載デバイス(FPGA)に適したDAC設計を行った
- その結果、ノイズを抑えて分解能 2 nT をほぼ満足する結果を得た

<u>ΔΣDACの性能評価</u>

- ・ 理想的なDC入力時のノイズ評価から10 mVp-pのDACノイズがみられた
- ・ 変調出力のスペクトルは設計結果と非常に近い値を得た
- アナログ出力のスペクトルは測定器の精度により全周波数帯で評価できなかった。

<u>今後の計画</u>

- ・アナログ出力のスペクトルで1 kHz以上の周波数が一致することを確認する
- ・ 磁力計全体での周波数応答の計算 → カットオフ周波数=60 Hz
- ・ 磁力計の製作と性能評価を行う

参考文献

- J. L. Burch and V. Angelopoulos, The THEMIS Mission. Springer New York,2008
- Magnes et al, 2008, Meas. Sci. Technol., vol.19
- Magnes et al, 2003, Meas. Sci. Technol., vol.14
- H U Auster et al 1995, Meas. Sci. Technol. 6 477-481.
- M. Kono, M. Koyanagi, and S. Kokubun, A Ring-Core Fluxgate for Spinner Magnetometer, J. Geomag. Geoelectr., vol.36, pp149-160, 1984
- Primdahl, F., The fluxgate magnetometer, Journal of Physics E: Science Instrum, Vol.12, pp241-253, 1979

岡田 和之, 松岡 彩子, 中村 正人, JAXA - RR-05-019, 2006 参考 Web site

http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/main/index.html http://opfm.jpl.nasa.gov/europajupitersystemmissionejsm/