

ワイヤーアンテナを有する惑星磁気圏探査衛星での自在な姿勢変更を実現するための制振制御手法の検討

47-156066 太田 裕介

(指導教員 坂井 真一郎 准教授)

Key Words: Geospace Exploration Satellite, Attitude Control, Spin Space Craft, Wire Antenna

1 はじめに

惑星磁気圏の構造や、太陽風と地球磁気圏との相互作用などの発生メカニズムなどを解明するために現在までに数多くの惑星磁気圏探査衛星が打ち上げられている。惑星磁気圏探査衛星には、電磁場を観測する観測機器であるワイヤーアンテナと呼ばれる長さ 15~50 m ほどの細長い構造物がついており、従来はこの張力を確保するために「スピン安定方式」という衛星本体をコマのようにスピンさせる受動的な姿勢制御方式がとられていた。(ジオスペース探査衛星「あらせ」の姿勢制御系 [1] など)

しかし、この方式では衛星設計の自由度が制限されたり、観測のための機動的な姿勢変更を行なうことが難しいなど課題が多い。具体的には、スピン安定方式は衛星本体を回転させることによるジャイロ剛性を利用した受動的な姿勢制御方式であるため、スピン軸の方向を制御し、観測姿勢を機動的に変更することも難しい。また、衛星本体が回転しているため、カメラ等の光学観測機器による観測も難しくなる。このため、従来は搭載される観測機器ごとに別々の衛星を打ち上げる必要があった。さらに、ワイヤーアンテナの振動は衛星本体と複雑なメカニズムにより連成する。[2]

本研究では、これらの問題を解決するために、従来方式に改良を加えた「二重スピン安定方式」をベースとした姿勢制御系を提案する。これにより、ワイヤーアンテナを有する従来の惑星磁気圏探査衛星が抱えている問題を一挙に解決することができ、また、従来複数の衛星により観測する必要があった粒子と波動と光学機器による観測を一機の衛星により実現されることが期待される。

本論文では、その初期検討として、自在な観測姿勢の変更を実現するために、衛星本体の姿勢を乱し観測を妨げる姿勢変更後のワイヤーアンテナ残留振動の高速な抑制制御手法の検討を行い、その有効性をシミュレーションにより検証する。

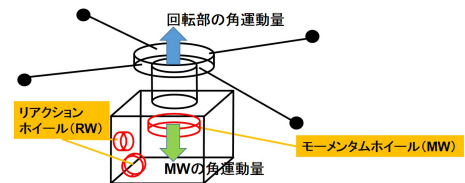


Fig.1 提案する衛星のコンフィギュレーション

2 二重スピンをベースとした姿勢制御系の提案

本研究では、自在な観測姿勢の変更を実現するために、Fig.1 のような二重スピン安定方式をベースとした衛星を提案する。二重スピン安定方式は、衛星を回転部と非回転部に分ける方式で、回転部は常に回転しており、非回転部は慣性空間に対し静止している。非回転部にはバス機器や、カメラや粒子観測機等の回転することを好まない観測機器を搭載する。ワイヤーアンテナが取り付けられている部分は回転させておき、それ以外の部分は静止させる。さらに自在な姿勢変更を実現するためのアイデアとして、回転部が持つ角運動量をキャンセルするためのモーメントムホイールを非回転部に搭載することにより、回転部を持ちながらも、衛星全体の総角運動量は等価的に 0 となる。加えて、姿勢制御用のリアクションホイールを残りの 2 軸に搭載することにより、例えば、磁力線追尾のような 3 軸の高速で自由な観測姿勢の変更が可能となる。モーメントムホイールによる回転部の角運動量キャンセルに関しては、水循環変動観測衛星「GCOM-W1」衛星での適用例がある。[3]

3 ワイヤーアンテナの振動抑制制御

衛星の姿勢変更マヌーバ後、ワイヤーアンテナには面内振動・面外振動と呼ばれる振動が発生する (Fig.2)。ワイヤーアンテナの面外振動（縦方向の振動）が衛星本体の首振り運動（ニュートーション運動）と連成し、またワイヤーアンテナの面内振動（横方向の振動）が衛星本体のスピン運動と連成する。観測精度と姿勢の指向精度の確保の観点から、これらの姿勢とワイヤーアンテナの振動は高速に抑

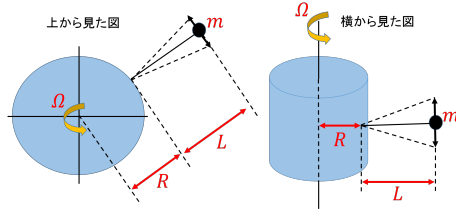


Fig.2 ワイヤアンテナの面内振動 (左) と面外振動 (右)

圧されることが求められる。

本研究では、姿勢変更マヌーバ後のワイヤアンテナ振動を、面内振動・面外振動共に初期振幅 5 deg から、低軌道の軌道周期の 1/4 (1500 秒) ほどで 2 deg 以内まで減衰させることを振動抑制の目標とする。以下では簡単のため、ワイヤアンテナは正対 2 本とし、面内・面外振動ともにホイールが発生するトルクにより抑圧することを目標とするが、2 本のワイヤアンテナの長さが同じ場合、初期振幅が面内逆相、面外同相の条件のときに、1 つの制御入力では不可制御となってしまう問題が発生する。この問題を回避するため、あえて 2 本のワイヤアンテナの長さを不揃いにし、固有振動数をずらすことを提案する。遠心振り子モデルによる、衛星回転部に付属するワイヤアンテナの面内振動・面外振動の固有振動数は以下の式で示される。

$$\omega_{in} = \sqrt{\frac{R\Omega^2}{L}}, \quad \omega_{out} = \sqrt{\frac{(R+L)\Omega^2}{L}} \simeq \Omega \quad (1)$$

ここで、 Ω は回転部のスピンレートを表す。面内振動に関しては、固有振動数の差を利用し、一本ずつ交互に、アンテナ振動の角速度を状態量とした振動抑制制御をかけることにより、振幅を減衰させる (提案手法 (1))。固有振動数のあまり変化しない面外振動に関しては、以下の振幅 α_1, α_2 を入力とする符号関数により同相・逆相を判別し、可制御な逆相のときのみアンテナ振動の角速度を状態量とした制御器を ON する戦略をとることとする (提案手法 (2))。

$$|\text{sgn}(\alpha_1) + \text{sgn}(\alpha_2)| = \begin{cases} 2 (\text{同相}) \\ 0 (\text{逆相}) \end{cases} \quad (2)$$

4 シミュレーション

本研究にて提案する衛星の振動抑制制御の初期検討として、回転部とワイヤアンテナ部分のダイナミクスに振動抑制制御を実装したシミュレーションを実施した。面内・面外振動抑制制御器は振動角の角速度をフィードバックする D 制御とし、ワイヤアンテナの長さで制御器のゲインは目標とする収束時間と制御入力に 1 Nm 以下となるよう、試行錯誤的に決定した。

Fig.3, Fig.4 に提案手法によるワイヤアンテナの振動抑制制御の結果を示す。面内振動が逆相、面外振動が同相の

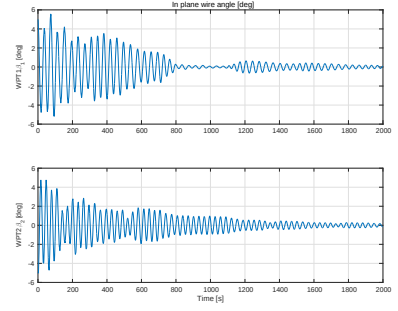


Fig.3 ワイヤアンテナの面内振動

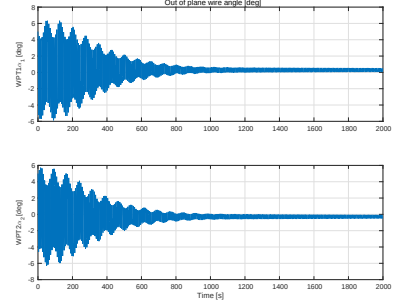


Fig.4 ワイヤアンテナの面外振動

場合であっても、提案手法によりワイヤアンテナの振動を 900 秒以内に面内 1 deg、面外 0.5 deg に抑圧できていることが読み取れる。

5 まとめ

本研究では、二重スピン安定方式をベースとした姿勢制御系を提案し、その基礎検討として衛星の姿勢変更マヌーバ後のワイヤアンテナの面内・面外の残留振動の抑制制御についての検討を行い、提案手法の有効性を示した。今後の課題としては、非回転部を含めたシミュレーションの実施、安定性・外乱に対するロバスト性の検討、姿勢制御 (スピン軸方向制御) 器との併用などが挙げられる。

参考文献

- [1] Kazuki Yokota, Toshio Kamiya, Kazuhisa Tanaka, Yasuhiro Kusakawa, Atsushi Horia, Shin ichiro Sakai, and Yusuke Ota. "Aocs design and on-orbit performance of arase/erg satellite". In 69th International Astronautical Congress, IAC-17-C1.IP.25, 2017.
- [2] Uday J Shankar, Madeline N. Kirk, and Gabe D. Rogers. "Van Allen Probes On-Orbit Verification of Spacecraft Dynamics". In Proceedings 24th International Symposium on Space Flight Dynamics, 2014
- [3] 松生研二, 前田健, 笠原希仁. 「AMSR2 の軌道上アンバランス推定と OBM による調整結果」. 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3F14, 2012.