

高精度ファイバージャイロ IRU の研究

Study of High Performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit

総合技術研究本部誘導・制御技術グループ 巴谷真司, 鈴木秀人, 石島義之
Institute of Aerospace Technology,
Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group
Shinji Mitani, Hideto Suzuki, Yoshiyuki Ishijima

Abstract

To fulfill the requirements of low noise, stable bias and stable scale factor for the application to the future spacecraft attitude control system, we are studying the high performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit (FOG-IRU). In FY 17, we examined improvement of angle random walk for achieving the highest level in the world. After refurbishment, we evaluated fundamental performance, temperature and magnetic characteristic of the re-fabrication model and obtained a good prospect in developing the high performance FOG.

1. はじめに

これまで我が国においては衛星用ジャイロとしてチューンドドライジャイロ (TDG), あるいは浮動型レート積分ジャイロ (FRIG) が用いられてきた。しかしこれらの機械式ジャイロは可動部を有することによる擾乱の発生や, 寿命の限界, 更にダイナミックレンジを大きくとれないなどの点から将来ミッションへの適用への問題点が挙げられている。

海外の衛星では近年, 中精度のものから超高精度のものまで幅広く FOG(Fiber Optical Gyro : ファイバージャイロ)が使われてきている。FOG は機械式の衛星搭載用ジャイロに比べて, 可動部が無く原理的に高信頼性を有し, 無擾乱振動, 広ダイナミックレンジ, 瞬時起動可能などの有利な性質を持つことがよく知られており, 総じて宇宙機搭載用としては以下の点での優位性が上げられる。

- ・ 超高精度から中精度まで要求される全てのミッションで共用できる技術である。
- ・ 必要な EEE 部品数が少ないため, コストが低く抑えられる。
- ・ 全て「固体」技術であり, 低擾乱, 高精度, 高信頼性等の利点を有する。

我が国の FOG 搭載例では特に小型衛星において目覚ましい。最近では INDEX 衛星(れいめい)でその性能が実証された^[1]。れいめいでは軌道 1 周回当り約 70%の間, 恒星センサ(STT)が使えない期間が存在するが, 搭載した中精度 FOG はその期間を伝播するに足る十分なバイアスレート安定性を有していることが実証された。

最近の地球観測衛星・科学衛星では更に高精度を要求するミッションも増加している。例えば, 現在計画中の電波天文衛星 ASTRO-G のように大角度マヌーバを行う衛星においては, 高スケールファクタ(SF)安定性を IRU 性能として要求しており, 本性能も将来 IRU の性能として重要になると考えられる。

STT のような光学絶対姿勢センサの高精度化や高速サンプリング化が進む中, れいめいの例のような STT 使用制約または, 太陽・地球初期捕捉時・コンティジェンシー時等の必要性を考えると, IRU の果たす役割はまだまだ大きいと言える。

このような機械式の問題点と高性能化が指向される動向の中, 著者らは従来よりも高精度の FOG による衛星搭載用 IRU(Inertial Reference Unit : 慣性基準装置)の開発を開発すべく研究を実施しており, 本稿は昨年実施されたジャイロのバイアスレートの高精度安定化を目指した開発研究結果を主に報告する。

尚、本研究は平成 13 年度より研究を開始し、東京大学の保立和夫教授(宇宙科学研究所でロケット用 FOG-IRU(Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit)を開発)に客員として助言を頂きつつ、宇宙科学研究本部の橋本樹明教授、戸田知朗助教授らと共同で開発を進めている。また、本 FOG-IRU の開発試作は日本航空電子工業株式会社(JAE)が担当しており、本報告は JAE 社の平成 17 年度成果に基づくものである。

2. 研究の概要

(1) 目標性能

高精度 FOG-IRU の具体的な目標仕様を表 1 に挙げる。将来の観測衛星などの高精度姿勢決定要求を考慮して設定した。IRU と STT から成る高精度姿勢決定系構成において、ランダムノイズ 1arcsec(1σ) の STT の信号を 10Hz フィルタリング時に 0.1arcsec(1σ) の姿勢決定精度を達成できることを目標に、高精度 FOG-IRU の角度ランダムウォーク(ARW)として 0.0005deg/√h の値を設定した。ARW はジャイロのバイアスレート安定性の指標として、よく用いられる指標であり、本設定値は海外の高性能姿勢センサと比肩するスペックである。

また、ARW とパルスウェイト分解能に起因する量子化雑音 Q がアラン分散 AVAR(τ)^[2]に及ぼす影響は次式となる。

$$AVAR(\tau) = \frac{ARW}{\sqrt{\tau}} + \frac{\sqrt{3}Q}{\tau}$$

AVAR(τ)に τ を乗じた値は、ジャイロ出力を時間 τ だけ積分して得られる衛星姿勢角の推定値の分散に等しい^[3]。目標としている STT-IRU 姿勢決定系 10Hz フィルタリング時すなわち 0.1 秒積算のときに Q による影響が ARW による影響よりも十分小さいことが望ましいことから、パルスウェイトとして 0.002arc-sec/pulse を目標値として設定している。尚、SF 安定性については、目標に掲げている性能を昨年度達成している。

Table 1 Target performance of FOG-IRU

| Item | Target value |
|----------------------------------|--|
| Angular Random Walk (ARW) | 0.0005deg/√h(1σ) |
| Bias Stability (Short Term) | 0.002deg/h(1σ) |
| Dynamic Range | ±10deg/sec |
| Scale Factor (Pulse wait) | 0.002arc-sec/pulse |
| Scale Factor Stability | 10ppm(1σ) |
| Mass, Electric Power (of an IRU) | Should be smaller, but not specified explicitly in this study. |

(2) 主な特徴技術

FOG-IRU の原理等は割愛する^[4]。現在開発中の FOG-IRU EM 検討モデルの機能系統ブロック図を図 1 に示す。本研究では、設計要求値を満たすために様々な要素技術を適用している^{[5] [6]}。

光源としては高出力・低コヒーレンス性を有する EDF(Erbium Doped Fiber)光源を採用している。低コヒーレンス性は散乱光のような光学誤差を抑制するために、高出力性は S/N 比を向上させショットノイズや増幅器ノイズを相対的に低減させるために必須の性能である。他に耐放射線性の特性も有する。コイルのファイバとしては安価で入手容易な SM(Single Mode)ファイバを採用している。これは、偏光子として極めて良質な消光比 60dB 以上を持つニオブ酸リチウムの導波路型位相変調器と偏光を解消するデポラライザを使用することにより、センシングコイルに使用するファイバを PM(Polarization Maintaining : 偏波面保存)ファイバである必要をなくすることが可能となっている。また、コイルの巻き

方はオクタポール巻きと呼ばれる、Shupe 効果による外乱感受性を低減することができる対象巻きを採用している[7].

EDF 光源を採用することによって、相対的に支配的な光学雑音誤差となる RIN(Relative Intensity Noise)に関しては、アクティブ方式の RIN 補正回路を採用し、光の揺らぎをモニタリング補正することにより低減し、更なる高精度化を実現できる。

またデジタルゼロダイン方式により、左右両周り光の位相差を高精度に補償する光学的な零位法が実現でき、良好なスケールファクタ特性と高ダイナミックレンジを確保している。

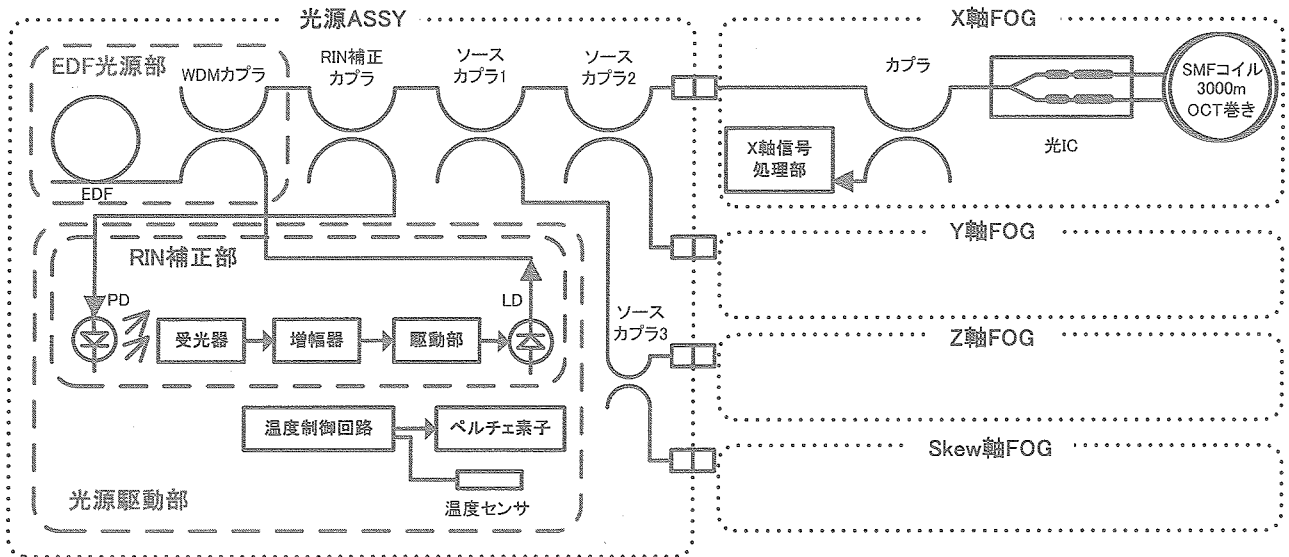


Fig. 1 Functional block schematics of Pre Experimental Model

3. 成果の概要

(1) ランダムウォークの改善研究結果

はじめに、平成 17 年度に実施したランダムウォーク改善のために実施した研究結果の概要を述べる。平成 16 年度に FOG の誤差要因の検討を実施した結果、光学的な誤差要因が大きいことが判明し、偏光度を精密管理することにより精度を大幅に改善することができた。今年度は引き続き、光学的誤差要因の検討を PM ファイバの外乱感受性の観点から再検討した。その結果を受けてツインデポラライザの改良検討を行った。また、誤差要因の検討として信号処理回路部の要因についても検討を行い、AD 入力部のノイズ要因が誤差につながることを突き止めた。

(1-1) ツインデポ系の改良検討

PM ファイバは SM ファイバよりもファイバの構造及び被服の材料の違いによる影響を受けやすく、また側圧に弱いので、外乱の受け方によっては偏波面保存特性を劣化してしまう等の特性が知られている。よって、外乱感受性の高い PM ファイバを必要最小限の長さにするには性能向上に繋がる可能性が高いと考えられる。この観点から、現在採用しているツインデポラライザ方式(図 2)でのデポラライザ長の短尺化を実施する。またその際に合わせてデポラライザの長さの最適配分を解析し、設計改修に反映した。

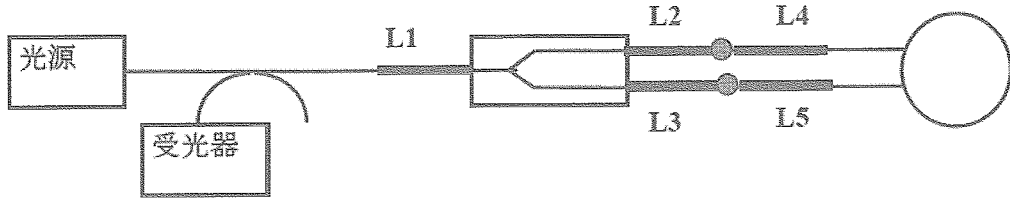


Fig. 2 Twin-depolarizer configuration

(1-2) 信号処理回路検討

FOG からの光信号を遮断し、A/D 入力部のノイズ量を測定した。結果、キャリア周波数に近い帯域にノイズ源が存在することが判明した。AD 入力部にキャリア周波数及び高次成分が重畳すると、FOG 信号とともに検波され誤差となる。パルス分割回路を高分解能化した場合、水晶発信器の周波数も高くなる。このため、発信器に含まれる高次の成分が重畳するとランダムウォーク悪化の一因となると考えられる。本件の対策として、AD 入力部のキャリア周波数の逡倍に近い電氣的なノイズ源を特定し除去する検討を実施し、回路改修に反映した。

(2) 改修及び改修後性能評価試験

前節の検討結果を反映するために現存の FOG EM 改修モデルを再改修した。ランダムウォークの改善のための反映点は次の 2 点である：(1) デポライザ長が誤差軽減の観点から最適かつ最短となるよう光学系を分解、再融着接続を実施した。(2) AD 入力部のキャリア周波数及びその高次成分の周波数カップリングノイズの原因を見直し、アナログ回路を再改修した。尚、性能評価時のパルスウェイトは 0.06 arc-sec/pulse で行った。

(2-1) 基本性能評価結果

現状のモデル設計値でサンプル時間を 0.1 秒とした場合のアラン分散評価を実施した。結果を図 3 に示す。アラン分散評価から量子化誤差との交点は $\tau=1[\text{sec}]$ の近傍にあることが分かり、この領域では量子化誤差が見えるレベルまで ARW が低減されていることを表し、概ね理論的に予測される結果となった。このことは 0.1 秒積算使用時においては、更なる高分解能化を必要とすることを表している。また同時に、このアラン分散評価結果から、ランダムウォークは $0.0004\sim 0.0006\text{deg}/\sqrt{\text{h}}$ を実現していることが分かり、目標性能の領域に入っていることが確認できた。今回評価時は RIN 補正を実施していないが、RIN 補正を実施すれば更なる高精度化を達成できる見込みがある。

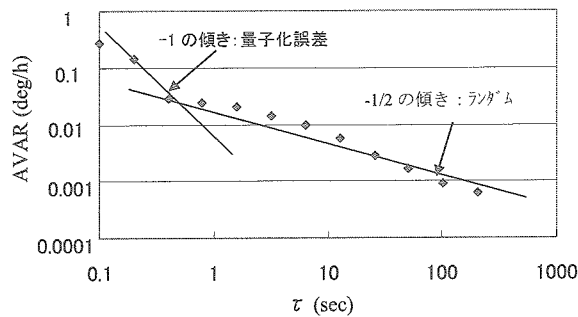


Fig. 3 Allan Variance (Pulse Wait : 0.06 arc-sec/pulse)

(2-2) バイアス温度特性評価

FOGの性能に影響する Shupe 効果を定量的に評価するため、温度変化とランダムウォークの関係性を評価した。通電されていない恒温層内に SM コイル系を配置し、自己発熱による温度上昇に対するバイアス変動、ランダムウォーク変動を評価した。結果を図 4 に示す。バイアスの温度特性に関しては温度に対して線形なバイアス特性となり、バイアスのうねりなど偏光状態に起因するバイアス誤差が抑圧されていることが確認された。バイアスの挙動は温度に対して非常に滑らかで温度補正が十分可能であることが判った。

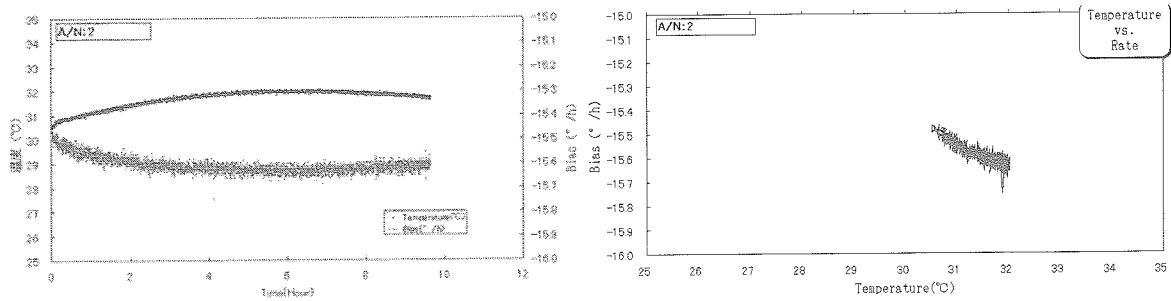


Fig. 4 Result of bias fluctuation (left), and relationship between bias and temperature (right)

(2-3) 磁気感度評価結果

磁気シールドの要求値を定量化するために磁気感度試験を実施した。本評価の結果として得られた偏光度と磁気感度の値により磁気シールドの具体的厚み・構造を明確化することを目的とする。SM コイル系において、入力軸周りに 45deg ずつ回転させ地磁気によるバイアス変動量から磁気感度を評価した。結果を図 5 に示す。地球磁界を用いてジャイロコンパスの磁気感度を計測し、0.05deg/h/Gauss 程度の磁気感度であることを確認した。

ただし、磁気感度に関しては地球磁界を利用したため、ジャイロの方位を測定毎に変化させている。この点においてジャイロの方位を変化させたことによる温度的な変動の影響等の分離が必要であり、今後印加磁界を強くして温度の影響と分離できるように評価する等の追加評価が必要であると考えている。

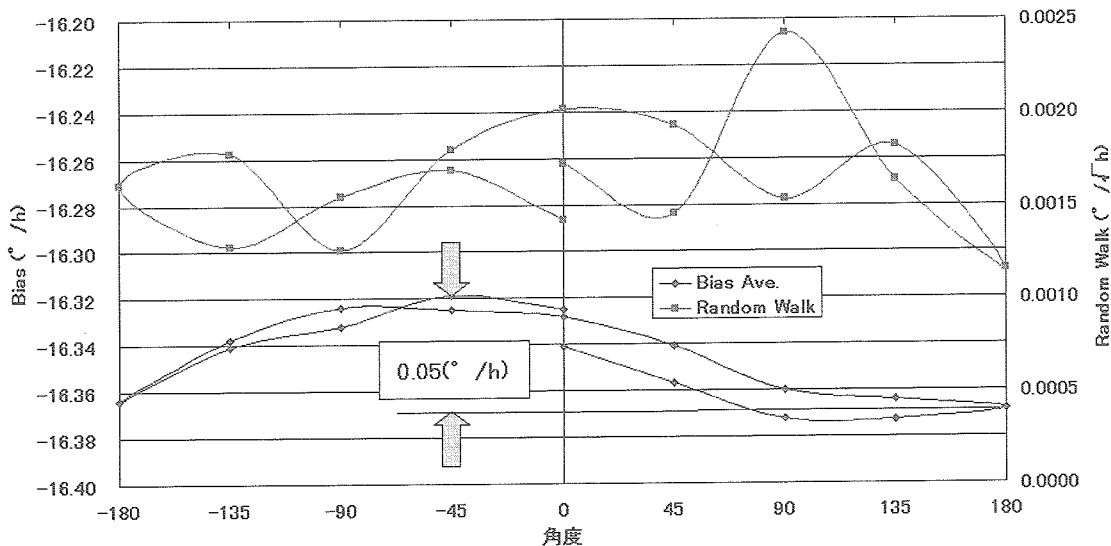


Fig. 5 Magnetic sensitivity characteristic

4. まとめ

平成 17 年度の達成結果としてバイアスレート安定性の重要な指標である ARW の目標性能を達成することができた。目標パルスウェイト高分解能時も安定してこの性能を達成することが今後の目標であるが、重要な性能である ARW が目標性能を達成したことを受けて、大方 EM モデルを開発するに足る成果を得たと言うことができる。

達成された成果と課題を基に、以降引き続き開発研究を実施する予定である。最後に、FY18 年度以降の開発計画を述べる。

(1) 熱真空環境下での温度制御性能評価

熱真空環境下での温度制御方法を解析・評価し、適切な温度制御法を検討する。

(2) 電気回路高精度化の検討

高精度 ARW を安定して実現できるパルス高分解能化の検討を実施する。また RIN 補正を実施し、更なる ARW 低減に努める。

(3) 振動・衝撃環境下での耐振動性能評価

打ち上げ振動レベル(QT)の振動試験を実施し、性能への影響を検証する。

(4) FOG-EM 設計

以上の FOG 要素技術検討により得られた知見を総合して EM 設計を詳細化し、製作準備を進める。

(5) FOG-IRU を見据えての研究開発

計画されている技術実証衛星や科学衛星への搭載を見据えた、IRU レベルでの構想設計も実施してゆく。

[参考文献]

- [1] 齋藤宏文, “小型 FOG の温度制御による高性能化-小型科学衛星れいめいの例-”, Proceedings of 37th Meeting on Lightwave Sensing Technology, 2006
- [2] David W. Allan, Neil Ashby, Cliff Hodge; “Science of Timekeeping; Hewlett-Packard Application Note 1289”; 1997
- [3] IEEE Std 952-1997, “IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros”
- [4] Herve Lefevre, “The Fiber Optic Gyroscope”, Artech House Inc., 1993, ISBN 0-89006-537-3
- [5] Usui, Ohno, “Recent Progress of Fiber Optic Gyroscopes and Applications at JAE”, OFS-15
- [6] 巳谷真司, “高精度 FOG-IRU の研究”, 第 49 回宇宙科学連合講演会, 2005
- [7] D. M. Shupe, “Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer”, APPLIED OPTICS, Vol. 19, No. 5, 1980