

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289327

研究課題名(和文) 小型衛星によるマイクロ波合成開口レーダ観測の高度化の研究

研究課題名(英文) Research on Advanced SAR Observation with Small Satelli

研究代表者

齋藤 宏文(Hirobumi, Saito)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：80150051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：人工衛星からの合成開口レーダ(SAR)観測を100kg級の小型衛星で実施できるようSARシステムの小型軽量化を図る研究を行った。SAR観測アンテナとしては、打上げ時収納体積が小型な展開式ハニカムパネルスロットアレイ・アンテナの2偏波共用化の設計試作を行い所定の成果を得た。大電力送信マイクロ波の生成にはGaN増幅器からの出力を6合成できる電力合成器を設計試作した。SAR観測データのダウンリンクのために、ほどよし4号の64APSK,505Mbpsの高速通信実験成果に基づき、2-3Gbpsの高速通信システム検討を行った。

これらの成果により本グループは内閣府研究開発プログラムImPACTに採択された。

研究成果の概要(英文)：We have performed researches on miniaturization of synthetic aperture radar (SAR) for 100kg-class small satellites. We selected as SAR antenna a deployable, honeycomb panel, slot array antenna that can be stowed compactly in a launching rocket. In order to perform polarimetric SAR observation, we have developed dual circular polarization panel antenna. RF output from six modules of GaN microwave power amplifiers are combined up to 1kW. We have developed a circular waveguide power combiner, inputs of which are microstrip line from the amplifier circuits. We design a 2-3Gbps high speed downlink for SAR radar data based on our previous research heritage of Hodoyoshi 4 (505Mbps downlink experiment in 2015, 64APSK). Based on these research results, this research group acquired the research fund "ImPACT" from the Cabinet Office in 2016.

研究分野：工学

キーワード：合成開口レーダ 小型衛星 スロットアレイアンテナ リモートセンシング Xバンド

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星からのマイクロ波合成開口レーダ (SAR) 観測は、全天候、夜間を含む常時観測が可能な地球観測監視手法であるという特長を持っている。しかし、SAR 衛星は、従来では、重量 2t-500kg の衛星重量と数 100 億円以上のコストが必要であると信じられており、一部の先進国政府機関の利用に限られてきた。

SAR 観測を、相乗り打ち上げが可能な 100kg 級小型衛星にて実施し、1 機あたりのコストを 10-20 億円に抑えることで複数機打ち上げて、観測頻度の高い自然災害監視や、航路情報・船舶情報取得、気象観測などの新しいビジネス創成につなげることが研究代表者らによって構想されている。

### 2. 研究の目的

本研究代表者は、従来大型衛星が必要であった合成開口レーダ (SAR) を、図 1 に示すような相乗り打ち上げが可能な 100kg 級衛星を用いて、実現する開発を推進している。本研究では、SAR の小型化に有効で、以下の新規性先進性の高い技術を開発し、近い将来のミッションに実際に適用する。

(a) 平面ハニカムパネルからなるスロットアレイアンテナを、左旋・右旋の 2 円偏波対応にして、収納サイズの小さい展開アンテナにする研究。

(b) 小型衛星に適した SAR 送信信号波形、及びポラリメトリック SAR の信号処理の研究。

(c) 効率的な排熱処理に適する送信用マイクロ波 GaN 増幅器出力の 3 次元合成法の研究。

(d) 小型衛星から大量な観測データをダウンリンクする省電力通信の実用化の研究。

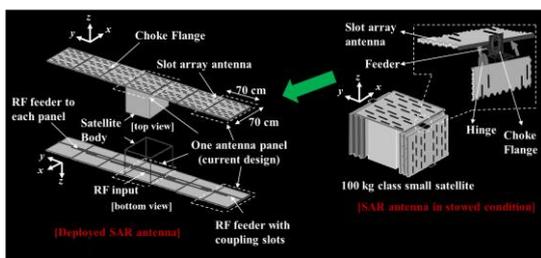


図 1 展開式ハニカムスロットアレイアンテナを用いた小型 SAR 衛星

### 3. 研究の方法

#### (a) SAR アンテナ

電気設計：東工大安藤、広川、榊による一層構造スロットアレイの研究成果に基づいて、必要な高い正面利得、低いサイドローブを持ち、軸比の小さい左旋・右旋円偏波の 70cmx70cm のハニカム構造のアンテナを設計試作する。東工大の安藤、廣川研の設備を借用して近傍界電磁波測定を行い、設計機能との差異を洗い出す。

高周波はハニカムパネル内を正逆方向に進行しながら、放射用スロットから自由空間に放射される。両偏波の同等性を保つために

は放射用スロットの結合度は、ハニカムパネルの中心について対称である必要がある。この制約の中で、サイドローブを抑えつつ、正面利得を最大にする手法は、未だ見出されていない。遺伝的アルゴリズム等の最適化手法を試みて、この課題を解決する。

熱構造設計：アンテナ面精度・熱変形：構造・熱歪に関しては、両翼で 4.9m にわたるアンテナ面の面精度誤差標準偏差を 2mm (波長の 1/15) 以下に抑える構造様式を選定し設計する。面精度劣化の要因は、太陽照射時の表裏温度差による熱ひずみ変形と、展開ヒンジ静定角の誤差・非再現性が支配的である。

前者に対しては、アンテナパネルより断面方向の熱伝導と剛性が高い、別の構造パネルで形状を維持しそれにアンテナパネルを付置する案を検討する。

アンテナ保持・展開機構：相乗り打ち上げのために、i) アンテナ収納領域を片翼 0.7mx0.7mx0.15m 以下にし、ii) 前項に述べた展開ヒンジ静定角の誤差を小さく (0.05° 以下) する、iii) 3 枚パネル展開を複雑な同期機構を伴わない、保持展開機構を検討・概念設計する。

#### (b) SAR 信号処理

小型 SAR 衛星に適した送信波形の構成などを検討する。

#### (c) 送信用マイクロ波の 3 次元合成法

複数の GaN 半導体チップで高周波を増幅してその出力を合成する際に問題となる点として、排熱処理の問題がある。導波管に複数の増幅デバイスを立体的に集積化した 3 次元合成器の設計を行い、高周波損失が少なく、排熱パスを確保する設計・部分試作モデルにて検証する。TM01 モードの円形導波管に動径方向から複数の増幅器から入射して増幅器出力を導波管モードに結合させる。パルスの duty cycle 比は、従来は 10% 程度であったものを、20-30% に高めることを目標にする。

#### (d) 高速ダウンリンク通信

研究代表者らと東京大学のグループが開発し、2014 年に 50kg 級超小型“ほどよし 4 号”に搭載される省電力高速ダウンリンク通信システムに対して、衛星と地上局の通信実験を実施する。搭載・地上系の新規開発成果により、ほどよし 4 号衛星では、中型・大型衛星と同程度の 500Mbps 以上の高速通信を目指す。それに基づいて長高速のダウンリンクに適した地上復調系の検討を行う。

搭載送信アンテナに対しては、右旋左旋を共用した偏波識別度の高いアンテナを開発する。

### 4. 研究成果

#### (a) SAR アンテナ

電気設計：2 偏波共用のハニカムスロットアレイ・アンテナの電気設計を、遺伝的アルゴリズムを応用して、アンテナピーク利得と SAR 観測の有効ビーム角のビーム効率を最適化する手法によって実施した。この設計を元に、

70cmx70cm の 2 偏波共用のハニカム構造スロットアレイ・アンテナを試作した。電気特性を計測し、開口効率約 50%を得た(図 2 参照)。両偏波のビーム方向が約 2 度ずれていたが、パネル誘電体材料の誘電率のモデル化の問題であることが判明し、問題解決の目処がついている。

熱構造設計：軌道上での熱的な歪対策としては、熱ひずみに脆弱なアンテナパネル単体での利用ではなく、その背後に熱歪に強固なバックアップパネル(アルミハミカムコ CFRP スキン)をはりつける製造法を採用した。

そして、アンテナパネルの非定常温度解析、熱歪解析を行った。モデルの検証として大気中で表裏に温度差をつけた状態での熱歪計測を行った。また、軌道上のアンテナパネルの温度分布の解析を行い、熱歪の少ない温度分布になるように熱設計を行った。その熱数学モデルの妥当性を検証するために、アンテナパネルの熱モデルを用いて、熱真空試験を実施した。それらの結果、軌道上におけるアンテナパネルの熱歪による面精度は、7 枚のアンテナパネル(全長 4.9mm)でおおよそ 0.5mm rms に収まる見込みを得た。

アンテナ保持・展開機構：片翼 3 枚パネルの機械的なダミーパネルを用いた片翼 3 枚パネルの展開試験を実施し、正しく機能することを検証した。展開静定角の再現性が、0.01 度以下であることを検証した。

(b) SAR 信号処理

SAR 衛星の直下点から比較的離れた観測地点では、SAR レーダのレンジ方向のアンビギュイティが大きくなるという問題点があった。このような観測では、信号対雑音比が劣化するため地上分解能を下げる(チャープ帯域を小さくする)ことが必要である。本研究

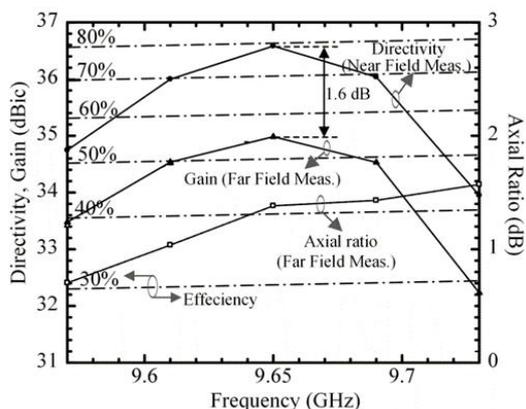


図 2 2 偏波ハニカムパネルスロットアレイ・アンテナ上：パネル全景、下：アンテナ利得、軸比



図 3 GaN 増幅器 6 入力円筒導波管電力合成器

では、そのような観測で、送信チャープ周波数帯域を時間的に移動させることで、等価的にパルス繰り返し周波数を低くする方式を提案し、シミュレーションによってレンジ方向のアンビギュイティが改善することを示した。

(c) 送信波の電力合成器の研究

6 個の 200W の X 帯 GaN 増幅器出力を直接導波管共振器に入力して電力合成し、矩形導波管にコンパクトに変換する、SAR 地上分解能 1m に対応する 300MHz の帯域を持った電力合成器の設計・製造・計測を行った(図 3 参照)。ネットワーク・アナライザを用いた RF 特性の測定を行い、周波数帯域約 280MHz、挿入損失 0.5dB 程度の電力合成器を試作できた。真空状態での大電力動作に伴う高周波放電の可能性を検討した結果、その危険性はすくないという判断を得た。ただし、確認のため真空での動作試験を準備している。

(d) 高速ダウンリンク通信

我々が開発した省電力高速送信機のフライトモデルをほどよし 4 号衛星に引き渡し、H26 年 6 月に打ち上げられた。宇宙科学研究所相模原キャンパスに設置した 3.8m アンテナ受信設備を最終整備した。12 月には 16 QAM, 348Mbps の高速ダウンリンク通信そして、H27 年 5 月にはほどよし 4 号衛星からの 64APSK 変調、シンボルレート 100MSPS, ビットレート 505Mbps ダウンリンク信号の復調復号に地球周回衛星として世界で初めて成功した(図 4 参照)。これは 50kg 級衛

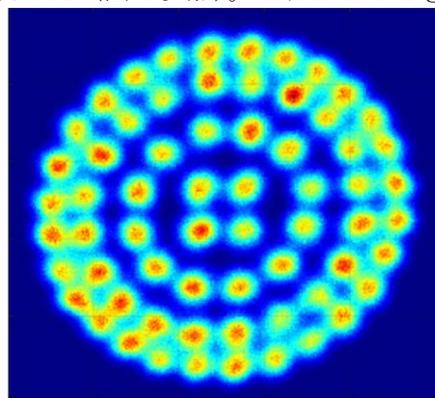


図 4 ほどよし 4 号衛星から相模原 3.8m アンテナで受信された 64APSK、505Mbps ダウンリンク通信のコンステレーション

星としては、世界最高速のダウンリンク通信速度である。

この成果を基に、次世代の高速通信システムの検討を行った。送信機のシンボルレートを2倍以上高めた300Msps(可変)とし、右円偏波、左円偏波を独立の通信チャンネルにとる偏波多重システムが最適との結論を得た。

デジタル部には民生の高速FPGA、及びDA変換器を用いる。RF部にはほぼよし4号搭載の部品の類似品を採用する。搭載アンテナには、右旋円偏波と左旋円偏波の分離度が極めて高いセブタムポラライザとコルゲートホーンアンテナが最適と判断した。

別予算である内閣府ImPACT経費を用いて、H28年度には、送信機と搭載アンテナの試作を製造開始した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Vinay Ravindra、Prilando Akbar、Miao Zhang、Jiro Hirokawa、Hirobumi Saito、Akira Oyama、A Dual Polarization X-band Traveling-Wave Antenna Panel for Small Satellite Synthetic Aperture Radar、IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION、査読有、Vol. 65、2017、pp1558-2221、DOI 10. 1109
- ② 渡邊 宏弥、深見 友也、齋藤 宏文、冨木 淳史、小島 要、新家 隆広、川元 光一、重田 修、布村 仁志、小型衛星搭載用の省電力高速送信機の開発、電子情報通信学会和文論文誌 B、査読有、Vol. J99-B、No. 7、2016、pp. 535-543、論文番号 2015WFP0008 発行日：2016/07/01、Online ISSN: 1881-0209
- ③ Prilando Rizki Akbar、Hirobumi Saito、Miao Zhang、Jiro Hirokawa、and Makoto Ando、Parallel-Plate Slot Array Antenna for Deployable SAR Antenna Onboard Small Satellite、IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION、査読有、Vol. 64、No. 5、2016、pp. 1661-1671

[学会発表] (計62件)

- ① Hirobumi Saito、Akbar Prilando Rizki、Ravindra Vinay、Hiromi Watanabe、Atsushi Tomiki、Jiro Hirokawa、Zhang、Miao、Shirasaka Seiko、Compact X-band synthetic aperture radar with deployable plane antenna and RF feeding system through non-contact waveguides -Project of a100kg-class SAR satellite -, Small Satellite、SSC16-VII-5、2016、6-11、Aug.、Logan、Utah、USA

- ② Fukami T.、Watanabe H. Saito、A. Tomiki、A. Mizuno、T. Iwakiri、A. Shigeta O、Nunomura H、Kojima K. and Shinke T.、Experiment of 384 Mbps downlink from 50-kg class satellite、10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation、IAA-B10-1302、2015、23、Apl.、Germany Berlin
- ③ Prilando Rizki Akbar、Hirobumi Saito、Miao Zang、Jiro Hirokawa、and Makoto Ando、X-Band Parallel-Plate Slot Array Antenna for SAR Sensor onboard 100 kg Small Satellite、2015IEEE International Symposium on Antennas and American Radio Science Meeting、MO-A1.1P.2、2015、19-24、Jun. Vancouver Canada
- ④ Vinay Ravindra、Prilando Akbar、Hirobumi Saito、Miao Zhang and Jiro Hirokawa、Optimal Cross-Range Pattern Synthesis Using Multi-Objective Genetic Algorithm for a Passive Antenna in Small Satellite SAR、The International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2015、S1.12、2015、9-12、Nov. Hobart、Tasmania、Australia
- ⑤ B. Pyne、V. Ravindra、and H. Saito、An Improved Pulse Repetition Frequency Selection Scheme for Synthetic Aperture Radar、The 12th European Radar Conference (EuRAD) 2015、EuRAD15-05、2015、6-11、Sep.、Paris

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

- ① 名称：チョークフランジ  
発明者：齋藤宏文、廣川二郎  
権利者：同上  
産業権の種類、番号：特許願 2016/016938  
出願年月日：2016. 2. 1  
国内・国外の別：国内
- ② 名称：展開構造物への高周波給電方式  
発明者：齋藤宏文、冨木淳史  
権利者：同上  
産業権の種類、番号：国際出願 WO 2014/203952 A1  
出願年月日：2014. 12. 24  
国内・国外の別：外国
- ③ 名称：展開構造物への高周波給電方式  
発明者：齋藤宏文、冨木淳史  
権利者：同上  
産業権の種類、番号：特許 2014/066237  
出願年月日：2014. 6. 19  
国内・国外の別：国内

[その他]

- ① ホームページ：齋藤宏文研究室  
[http://www.isas.jaxa.jp/home/saito\\_hirobumi\\_lab/](http://www.isas.jaxa.jp/home/saito_hirobumi_lab/)
- ② 宇宙科学研究所 一般公開  
2014, 2015, 2016 年
- ③ 渡邊宏弥, 深見友也, 齋藤宏文, 富木淳史, 小島要, 新家隆広, 川元光一, 重田修, 布村仁志, 電子情報通信学会  
平成 28 年度論文賞 平成 29 年 6 月 1 日 授賞式
- ④ 大学院学生 博士課程 深見友也 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会 平成 27 年度若手奨励賞, 平成 28 年 2 月
- ⑤ 大学院学生 博士課程 渡邊宏弥 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会 平成 27 年度若手奨励賞 平成 28 年 2 月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤 宏文 (Hirobumi Saito)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  
研究者番号：80150051

### (2) 研究分担者

福田 盛介 (Fukuda Seisuke)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授  
研究者番号：50332151

竹内 伸介 (Takeuchi Shinsuke)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教  
研究者番号：20353419

富木 淳史 (Atsushi Tomiki)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教  
研究者番号：50455466

アクバル プリランド R. (Akbar Prilando R.)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員  
研究者番号：50724506  
(平成 26, 27 年度 研究分担者)

ニジュニク オレグ (Nizhnik Oleg)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員  
研究者番号：70631612  
(平成 26 年度 研究分担者)