

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2007～2009

課題番号：19686025

研究課題名（和文） 高精度軸比画像生成用円偏波合成開口レーダの開発

研究課題名（英文） Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar to Generate High Precision Axial Ratio Image

研究代表者

J・T スリ スマンティヨ（J・T SRI SUMANTYO）

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・准教授

研究者番号：40396693

研究成果の概要（和文）：合成開口レーダ（SAR）センサは全天候型センサで、夜昼によらずに運用できる多目的センサである。現在、国内と国外に運用されているほとんどの SAR センサは直線偏波（水平と垂直偏波）およびその組み合わせしか動作していないので、限定された情報しか取れない。また、この SAR センサは高価、大型、複雑な構造、大電力、高雑音などのようなデメリットをもっている。このような背景で、本研究では、地表層における様々な情報を精密かつ高精度に観測できる、世界初かつ日本独自の技術による次世代航空機搭載用の円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）センサを開発した。また、この CP-SAR の実証実験を行うために、大型無人航空機（JX-1）を開発した。近い将来、この CP-SAR センサは小型衛星に搭載し、2014 年度に打上げし、地球温暖化をはじめ、グローバル環境のモニタリングに活用する。

研究成果の概要（英文）：Synthetic Aperture Radar (SAR) is a multi purpose sensor that can be operated in all-weather and day-night time. Recently, the SAR sensor is operated in linear polarization (HH, VV and its combination) with limited retrieved information. The characteristics of the conventional SAR sensor are bulky, high power, sensitive to Faraday rotation effect etc. Recently, we are developing the Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) onboard microsatellite to retrieve the physical information of Earth surface. For this purpose, we also developed the CP-SAR onboard unmanned aerial vehicle (UAV) for ground testing of this sensor. In the near future, CP-SAR sensor will be installed in small satellite and launch in 2014 to monitor the global environment, especially the global warming.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ

## 1. 研究開始当初の背景

合成開口レーダ (SAR) センサは全天候型センサで、夜昼によらずに運用できる多目的センサである。現在、国内と国外に運用されているほとんどの SAR センサは直線偏波 (水平と垂直偏波) およびその組み合わせしか動作していないので、限定された情報しか取れない。また、この SAR センサは高価、大型、複雑な構造、大電力、高雑音などのようなデメリットをもっている。さらに、わが国の大学レベルにおける SAR システムの研究開発がほぼ行われていないため、SAR システムにおける人材不足が深刻な状況であるので、SAR システムに関する研究と教育を緊急に処置すべきである。このような背景で、**本研究では、地表層における様々な情報を精密かつ高精度に観測できる、世界初かつ日本独自の技術による次世代航空機搭載用の円偏波合成開口レーダ (Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar : CP-SAR) センサを開発する**予定である。ここで、代表者は円偏波の振り舞いを利用して、左旋円偏波 (LHCP) と右旋円偏波 (RHCP) の受信信号の利得比または軸比画像 (Axial Ratio Image : ARI) を抽出し、挑戦的に新画像として提案する。この方法は、従来の SAR センサと比較して、プラットフォームの姿勢に依存しないし、地表層による散乱問題の高精度・低雑音化などを期待している。

研究代表者は、現在にいたるまでマイクロ波帯における直線偏波、円偏波、多偏波、多周波などに関する理論解析、アンテナ開発、電波伝搬、SAR とその画像信号処理、SAR システムなどの研究開発をした。特に、円偏波のマイクロストリップアンテナ (MSA) の設計・開発、電磁波散乱解析法、マイクロ波リモートセンシングまたは SAR、移動体衛星通信分野における様々な応用研究など、マイクロ波における幅広い研究に従事してきた。これらの研究成果が既に IEEE、IEE、International Journal of Remote Sensing、International Journal of Numerical Modelling、JSPRS、電子情報通信学会誌などの世界レベルの学会誌に掲載された。さらに、この研究は、国内外の研究者、企業などに注目され、国内外の研究機関、大学、学会などで招待講演を行った。また、国内外のマスメディアにも注目され、雑誌、新聞などに掲載された。本研究の成果または知的財産を保護するために、国内 (2 件) と国際特許 (1 件) も出願した。この研究成果と特許によって、現在に至るまで様々な賞を受けた。**この研究成果を踏まえて、本研究で次世代高精度軸比画像生成用円偏波合成開口レーダを開発する。**

## 2. 研究の目的

本研究の主な目的は、下記の研究内容を明らかにする。

(1) **CP-SAR の仕様**: 従来のセンサ (JERS-1 SAR、ALOS PALSAR、Pi-SAR) の特性と比較できるように、周波数 1.27 GHz 帯、利得  $\square 18$  dBi、軸比  $\square 3$  dB、ビーム幅  $9.8^\circ \pm 1.0^\circ$  (アジマス)、 $38^\circ \pm 4^\circ$  (レンジ)、オフナディア角  $40^\circ$ 、アンテナ: 送信側 = RHCP、受信側 = RHCP と LHCP にする。

(2) **軸比画像 (Axial Ratio Image:ARI)**: CP-SAR の受信アンテナは LHCP と RHCP の信号を同時に受信できるので、世界初の地表層における RHCP と LHCP の比により ARI を抽出する。この ARI で高精度な SAR 画像を生成することができると期待している。この ARI は地表層における様々なパラメータを高精度かつ精密に分類できる。例えば、植物の高さまたは年齢、バイオマス、雪氷、地質、土壌種類などの特性と軸比との関係を抽出できる。この ARI により、従来の SAR システムの特性も改善できる。この CP-SAR の多円偏波により、多様な情報を抽出できるので、小型、薄型、省エネなシステムの実現、入射角依存と多重散乱の軽減などができる。

(3) **小型、薄型、堅牢の円偏波アレーMSA**: ここで MSA を開発するために、各偏波のアンテナ間におけるアイソレーションまたは電磁気的な相互作用を考慮しなければならない。本研究では、現在にいたる円偏波 MSA の研究業績に踏まえて、コンフォーマル、軽量、薄型かつ高アイソレーションをもつ新型アレーMSA の開発を行う。

(4) **CP-SAR の新たな測定方法**: CP-SAR センサの円偏波特性を調べるために、新たに CP-SAR システム用の測定方法 (電波無響室内と外野実験) を開発する必要がある。ここで CP-SAR システムと測定装置との間における測定システムとプログラムを開発する。

(5) **CP-SAR のシステム・制御回路**: 本研究では、従来の直線偏波の SAR システムと大幅に異なり、円偏波の信号の送受信を行うので、新たに送信側 (RHCP) のチャープパルス信号ジェネレータと、受信側の RCHP と LHCP の信号処理用の回路、送受信制御回路、参照信号 (RHCP 送信信号) と受信信号の記録制御回路などを設計開発する。

(6) **CP-SAR の画像信号処理**: 本研究では、受信される RCHP と LHCP の信号を画像化するために、新たな SAR 画像信号処理のアルゴリズムを開発することが必要である。このセンサでは、同時に RCHP と LHCP の信号を受信し、ドップラーセンター周波数の推定、レンジ圧縮、コーナーターン、アジマス圧縮の処理を行わなければならない。RCHP と LHCP の各画像を得てから、幾何補正をし、軸比画像 (ARI) を抽出する。本研究では、SAR 画

像信号処理と ARI を抽出するためのプログラムを開発する。

### 3. 研究の方法

本研究方法は下記のように述べる。

(1) **CP-SAR の MSA の設計開発**: コンフォーマル、小型、薄型、堅牢の CP-SAR のアレーMSA の設計では有限地板解析のために、モーメント法 (MoM) による数値計算は IE3D シミュレータ (Zeland 社、現有設備) で行った。このソフトによって、アンテナと単素子の特性を精密に調査した。そして、計算時間とメモリの効率性を考慮すると、円偏波アレー MSA の特性を解析するために Designer ソフト (Ansoft 社、設備品備品として計上) を使用した。

(2) **CP-SAR の制御回路の設計開発**: 各偏波の送受信信号を制御するための回路を設計するために、アンテナの特性と統合解析できる Designer シミュレータ (Ansoft 社、備品費として計上) を使用した。ここで、アンテナとシステムの特性に対する地板の影響も検討した。この解析結果は、アンテナの入力特性、利得、偏波、パルス生成・制御回路などの電気的な特性である。そして、この CP-SAR センサは航空機搭載用のシステムであるので、耐候性を高めるためのレドームの材質、厚さ、形状などを考慮した。最後に、航空機または無人航空機 (UAV) に設置した状態を想定して、実使用環境に近いシミュレーションも検討した。

誘電体基板 (消耗品費として計上) はセンサのアンテナシステムと制御回路の試作に使用する。また、RF コネクタ、同軸ケーブル、セミリジットケーブル、変換コネクタ、中継コネクタ、CP-SAR 回路用部品、測定用レールセット (消耗品費として計上) は実験に使用する。CP-SAR のアンテナシステムの仕様 (入力インピーダンス、利得、軸比、ビーム幅など) に満足できる最適なアンテナ特性を得るために、様々な比誘電率と厚さをもつ誘電体基板の検討を行う予定である。

CP-SAR 回路に関して、高速な制御用部品、FPGA、増幅器または LNA、ミクサー、フィルターなどを使用した。本アンテナシステムの製作精度を向上させるために、プリント基板加工機 (MITS 社、現有設備) でアンテナシステムの設計図に従って自動的に CP-SAR 用のアンテナを製作した。

(3) **CP-SAR の特性測定**: 円偏波特性を確認するために広周波数帯域をもつ LHCP と RHCP スパイラルアンテナ (ETS-Lindgren 社、備品費として計上) を使用する。このアンテナは、ネットワークアナライザ E8364C (現有設備) または E5062A (現有設備) を使用して、CP-SAR センサ (入力特性、利得、ビーム幅またはカバレッジ、チャープパルス生

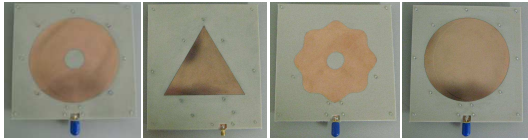
成・制御回路など) の特性を測定するために使用した。センサの放射パターンまたは利得特性を測定するために、標準ダイポールアンテナ (Anritsu 社、設備品として計上) を使用する。CP-SAR の特性は電波無響室内に測定を行った。

### 4. 研究成果

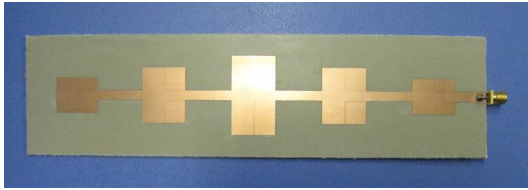
平成 19 年度～20 年度に、円偏波合成開口レーダ (CP-SAR) のアンテナ (図 1 を参照) と制御回路部分のシミュレーションなどに関する設計開発を行った。特に、平成 20 年度には、このアンテナと回路部分を HFFS ソフトなどで統合させ、CP-SAR システム (プロトタイプ) の動作確認を行った。また、このアンテナシステムの設計と CP-SAR の関連回路の開発と電波無響室内と外野実験のために、誘電体基板、RF コネクタ、セミリジットケーブル、CP-SAR 回路用部品を使用した。最終年度まで、アレーアンテナとマイクロ波回路の最終設計と開発、電波無響室内のアレーアンテナの特性を調査した。本研究では、航空機搭載の代わりに、安価、運営の柔軟性を考慮して、無人航空機 (UAV、図 2 を参照) の開発も行った。この UAV は CP-SAR システムを搭載し、25 kg のペーロードを搭載し、高度 1～4 km、飛行時間約 6 時間などで運用できる。

この UAV に搭載する円偏波合成開口レーダ (CP-SAR) の仕様として、周波数 1.27 GHz、解像度 1 m、パルス長 3.9-23.87 ms、パルス幅 16.04-245.89 MHz、オフナディア角 40°-60°、観測幅 1 km、アンテナサイズ 1.5 m x 0.4 m、アジマスビーム幅 7.94°、レンジビーム幅 29.78°、アンテナの放射効率 80%、PRF 1000 Hz、ピーク電力 5.27 W (1 km)~17.46 W (4 km)、平均電力 20.59-416.62 mW である。この CP-SAR は左旋円偏波 (LHCP) と右旋円偏波 (RHCP) の送受信のアンテナをもつ。この両電波を受信することによって、軸比画像を生成できる。この軸比画像によって、地表層におけるパラメータを抽出でき、様々な物理情報を把握することができる。例えば、土壌水分、バイオマス、雪氷、農地、海洋ダイナミックなどの観測に応用された。将来、このセンサは小型衛星に搭載して、植生または地表層における微小体積変化情報の抽出、バイオマス、地盤沈下・起伏 (地形変化) などのような災害監視のためにより正確な体積変化の監視に応用でき、植生生産量と災害の予測監視にも応用できる。

CP-SAR の信号処理用ソフトの開発に関して、受信される RCHP と LHCP の信号を画像化するために、SAR 画像信号処理のアルゴリズム (EduSAR ソフト) を開発した。

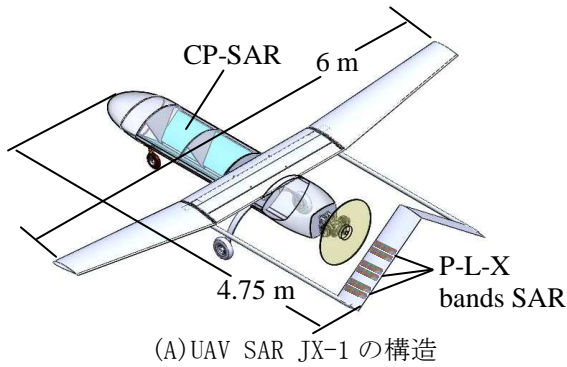


(A) 円偏波アンテナ (円偏波 SAR 用)



(B) 直線偏波 (直線偏波 SAR 用)

図 1. 合成開口レーダ用円偏波アンテナ



(A) UAV SAR JX-1 の構造



(B) UAV SAR JX-1 の実物

図 2. SAR 搭載無人航空機 (UAV SAR)

CP-SAR UAV のミッションでは、主に CP-SAR の**基礎研究**と**応用研究**を目的として開発した。

**基礎研究**では、地表層における円偏波散乱の解明、インタフェロメトリ (CP-InSAR)、軸比画像の生成などである。特に円偏波散乱の解明では、植生、雪氷、土壌・岩石、砂漠、草地などによる円偏波散乱の解析と実験を行う。CP-InSAR の実験では、円偏波と従来の直線偏波による InSAR の比較検討をし、CP-InSAR による標高データ、樹木の高さなどの抽出を行う。軸比画像の生成によって、軸比画像の特性と植生、地質、雪氷などの関係を調査する。

**応用研究**では、CP-SAR UAV は土地被覆マッピング、災害監視、雪氷監視、海洋監視などに応用する。土地被覆マッピングでは、森林・非森林の分類、樹高の推定、マングローブ地域の抽出、雪氷地域の抽出などを行う。災害監視では、この CP-SAR UAV を利用して、地

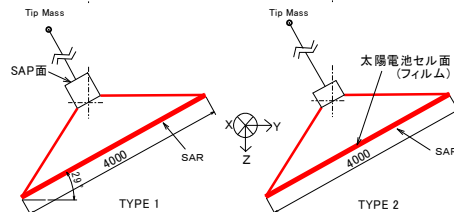
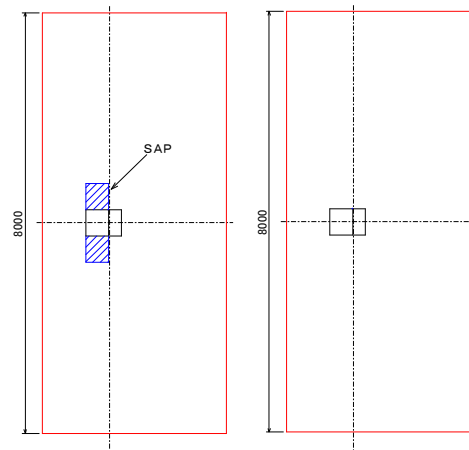
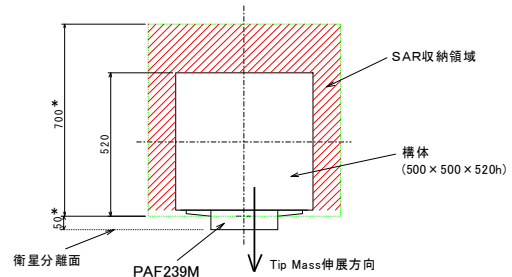
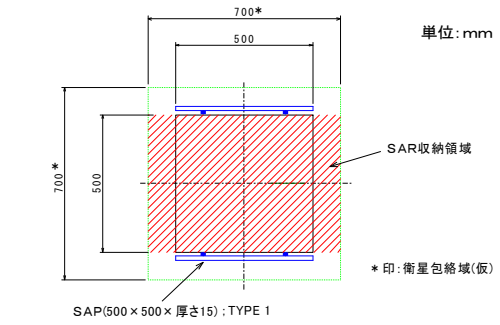


図 3. CP-SAR 搭載小型衛星の構造 (展開伸展型)

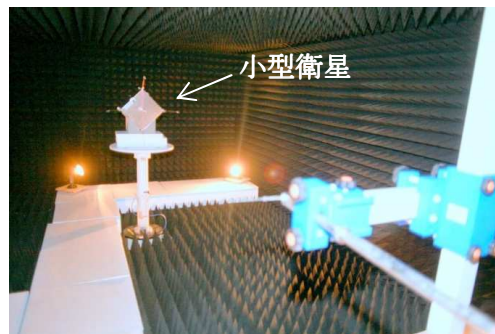


図 4. 本研究室にて小型衛星の測定

震地域の DInSAR の実験、火山活動の監視、森林火災・洪水地域などのマッピングを行う。雪氷監視では、氷山、氷河、極地などの監視である。海洋監視では、オイルスピル、内部波などの監視である。

本研究でも、平成 19 年度より東京大学、JAXA、日本大学などの研究者と連携して円偏波合成開口レーダ搭載小型衛星 ( $\mu$  SAT CP-SAR、図 3 を参照) の検討会も行い、概念設計を行った。本検討会では、地表層における様々な情報を精密かつ高精度に観測できる、世界初かつ日本独自の技術による高精度地球環境情報創出用  $\mu$  SAT CP-SAR の開発を提案するに至った。この  $\mu$  SAT CP-SAR の特性の測定方法 (図 4 を参照) なども開発した。ここでは、CP-SAR センサの概念設計が完了し、この CP-SAR センサの地上検証実験のために、ヨサファット研地上実証実験用大型無人航空機 (JX-1) に設置する予定である。本研究では、CP-SAR システム (アンテナ、信号処理、送受信回路など) を開発した。

今後の研究課題として、この CP-SAR センサは JX-1 と小型衛星に設置する。高度 1~4km、周囲数 km にわたり荒野で、飛行安全上、万一の時には回収が容易であるなどを考慮して、北海道函館市鹿部空港またはインドネシア・ヌサウィル飛行場で行う予定である。ここで、無人航空機の運用と航空法の対策に関して、宇宙航空研究開発機構研究開発本部飛行技術研究センターとインドネシア航空宇宙局の研究者らと連携して、共同研究を行う。この実証実験の結果を基にして、CP-SAR センサは小型衛星に設置して、2014 年度に小型衛星を打上げさせる予定である。近い将来、地球温暖化現象と地表層変化の関連の究明をはじめ、世界初地球環境情報創出用の小型衛星として活用する予定である。

#### 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 15 件)

1. M.M. Rahman, J.T.Sri Sumantyo, and M. Sadek, "Microwave and optical image fusion for surface and sub-surface feature mapping in Eastern Sahara," International Journal of Remote Sensing, 査読有, (Taylor and Francis) (掲載確定)
2. Luhur Bayuaji, Hiroshi Watanabe, Hideyuki Tonooka, J.T. Sri Sumantyo, and Hiroaki Kuze, "Study on land surface temperature characteristics of hot mud eruption in East Java, Indonesia," International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences, 査読有 (掲載確定)
3. Merna Baharuddin, Victor Wissan, J. T. Sri Sumantyo, and Hiroaki Kuze, "Elliptical microstrip antenna for circularly polarized synthetic aperture radar," International Journal of Electronics and Communications, 査読有(掲載確定)
4. Luhur Bayuaji, J.T. Sri Sumantyo, and Hiroaki Kuze, "Monitoring of Jakarta Urban Area Subsidence by using ALOS/PALSAR DInSAR," Jurnal Geografi, 査読有(掲載確定)
5. Luhur Bayuaji, J.T. Sri Sumantyo, and Hiroaki Kuze, "ALOS/PALSAR D-InSAR for land subsidence mapping in Jakarta city, Indonesia," The Canadian Journal of Remote Sensing, 査読有 (掲載確定)
6. Yashon O. Ouma, J. T. Sri Sumantyo, and Ryutaro Tateishi, 'Urban features recognition and extraction from very-high resolution multispectral satellite imagery: a micro-macro texture determination and integration framework' for IET Image Processing, 査読有 (掲載確定)
7. Merna Baharuddin, P.R. Akbar, J.T. Sri Sumantyo, and Hiroaki Kuze, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Sensor Mounted on Unmanned Aerial Vehicle," Journal of Automation, Control and Instrumentation, 査読有, Vol. 1, No. 2, pp. 1-6, March 2010
8. P.R. Akbar, J.T. Sri Sumantyo, and H. Kuze, "A Novel Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) onboard Spaceborne Platform," International Journal of Remote Sensing, 査読有, Vol. 31, No. 4, pp. 1053-1060, 20 February 2010 (London : Taylor & Francis).
9. M. Baharuddin, V. Wissan, J.T. Sri Sumantyo, and H. Kuze, "Development of an elliptical annular ring microstrip antenna with sine wave periphery," Progress in Electromagnetics Research C, 査読有, Vol. 12, pp.27-36, January 2010
10. J. Amini and J.T. Sri Sumantyo, "Employing a method on SAR images for forest biomass estimation," IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 査読有, Vol. 47, No.12, pp.4020-4026, December 2009
11. J.T. Sri Sumantyo, "Estimasi perubahan volume dengan metode DInSAR untuk Kajian penurunan tanah di cekungan Bandung," Jurnal Geografi, 査読有, Vol.2, No.2, pp.1-12, July 2009 (Jakarta : Universitas Indonesia)
12. M. Baharuddin, V. Wissan, J.T. Sri Sumantyo, and H. Kuze, "Equilateral Triangular Microstrip Antenna for

- Circularly-polarized Synthetic Aperture Radar," Progress in Electromagnetics Research C, 査読有, Vol. 8, pp. 107-120, June 2009
13. **J.T.Sri Sumantyo** and Jalal Amini, "Model for Removal of Speckle Noise in SAR Images (ALOS PALSAR)," The Canadian Journal of Remote Sensing, 査読有, Vol. 34, No. 6, pp. 503-515, Dec 2008
  14. Yashon O. Ouma, **J. T. Sri Sumantyo**, and Ryutaro Tateishi, "Multiscale remote sensing data segmentation and post-segmentation change detection based on logical modeling: Theoretical exposition and experimental results for forestland cover change analysis, Computers & Geosciences, 査読有, Volume 34, Issue 7, pp. 715-737, July 2008 (Elsevier)
  15. Yashon O. Ouma, **J. T. Sri Sumantyo**, and R. Tateishi, "Analysis of co-occur rence and discrete wavelet transform textures for differentiation of forest and non forest vegetation in very high resolution optical sensor imagery, International Journal of Remote Sensing, 査読有, Vol. 29, No. 12 June 2008, pp. 3417 - 3456.

[学会発表] (計 92 件)

1. **J.T. Sri Sumantyo**, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar onboard Unmanned Aerial Vehicle (CP-SAR UAV) for Microsatellite Pre-launching Test", The 142 - 143 Humanosphere Symposium, Humanosphere Mission Symposium, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, pp.59-60, March 11, 2010
2. **J.T. Sri Sumantyo**, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar onboard Small Satellite," Japan Geoscience Union Meeting 2009, J244-006 (Int. session), 18 May 2009
3. **J.T.Sri Sumantyo, H. Wakabayashi, A. Iwasaki, F. Takahashi, H. Ohmae, H. Watanabe, R. Tateishi, F. Nishio, M. Baharuddin, P. Rizki, and W. Victor**, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar onboard Microsatellite", Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2009) Proceedings, 2A3, Beijing, China 23-27 March 2009.
4. W. Victor, **M. Baharuddin, J.T. Sri Sumantyo** and H. Kuze, "Development of Measurement System for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar," The 16th Remote Sensing Forum - SICE,

- pp.11-12,RESTEC,Tokyo,March 2, 2009
5. **J.T. Sri Sumantyo**, Fumihiko Nishio, and Ryutaro Tateishi, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar to Generate High Precised Image for University's Venture", FY 2008 Futaba Electronics Foundation, No.14, pp. 245-250, September 2008.
  6. **J.T. Sri Sumantyo, H. Wakabayashi, A. Iwasaki, F. Takahashi, H. Ohmae, H. Watanabe, R. Tateishi, and F. Nishio**, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar onboard Microsatellite," Japan Geoscience Union, J239-013, 29 May 2008.
  7. **J.T. Sri Sumantyo, H. Wakabayashi, A. Iwasaki, F. Takahashi, H. Ohmae, H. Watanabe, R. Tateishi, F. Nishio, M. Baharuddin, and P. R. Akbar**, "Development of circularly polarized synthetic aperture radar onboard microsatellite," The 33th Remote Sensing Symposium, The Society of Instrument and Control Engineers (SICE), pp. 43 - 46, Chiba University, 8-9 November 2007.
  8. **J. T. Sri Sumantyo, M. Baharuddin, and P.R. Akbar**, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) onboard Microsatellite," Japan Geoscience Union Meeting 2007, May 23, 2007, Chiba, Japan. 他 84 件

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称 : Antennas for Communications  
 発明者 : 伊藤公一、J.T. Sri Sumantyo  
 権利者 : 千葉大学長  
 種類 : 国内特許  
 番号 : 特許第 4500968 号  
 取得年月日 : 2010 年 2 月 23 日  
 国内外の別 : 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www2.cr.chiba-u.jp/mrsl/>

<http://www.thejakartapost.com/news/2008/09/08/josaphat-tetuko-sri-sumantyo-getting-research-ground.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

J・T スリ スマンティヨ (J・T SRI SUMANTYO)

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・准教授

研究者番号 : 40396693