

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06115

研究課題名(和文) サブミリ波帯直交偏波共用広帯域周波数選択板に関する研究

研究課題名(英文) Research on wideband dual-polarization frequency selective surfaces in a submillimeter-wave band

研究代表者

真鍋 武嗣 (Manabe, Takeshi)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50358991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：惑星探査機搭載サブミリ波分光放射計のアンテナ給電系に用いる直交偏波共用周波数分離板(FSS)として、Jerusalem Cross Slot型とそれを改良したMaltese Cross Slot型FSSを設計し、その設計に基づいてフォトリソグラフィの手法により試作した。試作したFSSについてサブミリ波帯で反射透過特性を測定することにより所望の反射透過特性が得られることを確認した。さらに2層化により透過帯域の広帯域化を実現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Frequency selective surfaces (FSS) of Jerusalem cross slot array (JCSA) type and Maltese cross slot array (MCSA) type were designed for separating the submillimeter-wave band around 600 GHz by the method-of-moment calculations in view of future application to spaceborne submillimeter-wave spectrometric radiometer. Based on the designs, the FSSs were fabricated by applying a photolithographic process. By measuring the fabricated FSSs, we confirmed that both types of FSSs were fabricated with sufficient accuracies to achieve the desired reflection and transmission characteristics. It was also confirmed by numerical calculations that a transmission bandwidth as wide as 120 GHz could be achieved by double-layering the MCSA type FSS.

研究分野：電波工学

キーワード：周波数選択板 サブミリ波 モーメント法 Jerusalem Cross

1. 研究開始当初の背景

サブミリ波帯の放射計による地球周回軌道からのヘテロダイン分光観測は地球上層大気の微量成分の観測に有効であることが米国の EOS-Aura/MLS, 欧州の Odin/SMR, 日本の JEM/SMILES などを実証されており、今後、惑星や衛星、小惑星の大気等の探査への利用が期待され、欧州と日本による木星氷衛星探査ミッション(JUICE)への搭載などが計画されている。

このような氷衛星探査ミッションでは、サブミリ波帯における大気観測だけではなく、大気分子による吸収が無い波長域を選択することにより、惑星の氷衛星の地表面下部(数 mm ~ 数十 mm)からの熱放射を観測することができ、このサブミリ波帯熱放射輝度を他波長による表面温度観測データと組み合わせることにより、その表層を構成している物質の複素誘電率を推定することが可能となる。複素誘電率の実部からは表面物質の射出率が、虚部からは光学的厚みが求められる。この手法は、欧州の小惑星探査機 Rosetta に搭載されたミリ波・サブミリ波帯測器 MIRO による小惑星シュテインス(Steins)の観測で既に用いられている。彼らはミリ波帯とサブミリ波帯の異なる周波数帯における連続波放射輝度と近赤外分光器による温度観測結果を基に小惑星の熱慣性を推定し、その組成が月面の様な微細粉末状のレゴリスではなく、岩石タイプのものだと考察した。このように、サブミリ波帯の複数の帯域における広域熱放射輝度を偏波分離して観測することができれば、氷衛星の組成(表面氷、レゴリス、氷レゴリス)や物理特性(温度、複素誘電率、熱慣性など)などの詳細な情報を取得することができる。図1にこのような受信系の構成の検討例を示す。

このような観測をスペースの限られた小型の探査機を行うためには、複数の周波数帯の受信機でアンテナを共用し、それぞれ直交両偏波の観測ができることが望ましい、このように、複数の周波数帯でアンテナを共用する場合、サブミリ波帯ではワイヤグリッドにより周波数分離するのが一般的であるが、ワイヤグリッドを用いた場合には偏波により周

波数分離をするためそれぞれの周波数での偏波共用ができない。本研究ではここで周波数分離のために用いる広帯域で直交偏波共用可能なサブミリ波帯の周波数選択板を開発しようとするものである。

周波数選択板(frequency selective surface: FSS)はマイクロ波帯では、アンテナ給電系やレドームに広く用いられているが、サブミリ波帯では微細な周期構造となるため加工が困難なこと、誘電体を用いた FSS の場合誘電体損が大きな問題となることから殆ど用いられていない。

2. 研究の目的

図1の受信光学系で用いられるような、45度程度の大きな入射角の FSS において、グレーティングローブを発生させずに垂直水平の直交両偏波共用特性を実現するために、導体板に Jerusalem Cross 型などの共振型のスロットを二次元的に配列した FSS に着目し、直交両偏波共用特性を実現するためのスロット形状の設計法と広帯域化のための多層化の手法について検討する。この設計に基づき 600 GHz 帯付近を広帯域に選択透過する FSS を試作し測定評価することにより、サブミリ波帯において広帯域直交偏波共用特性を実現できることを実証する。

3. 研究の方法

本研究では、このような惑星探査機搭載サブミリ波分光放射計の複数の周波数帯の受信機でアンテナを共用する場合の周波数分離機構として Jerusalem Cross Slot 型の共振型の FSS と、これを改良した Maltese Cross Slot 型の FSS に着目し、先ず、単層の FSS について、斜入射の場合の直交両偏波共用のためのスロット形状の最適設計手法を確立し、この設計に基づいて、600 GHz 帯のサブミリ波を選択的に透過する単層 FSS を試作し、評価試験により単層 FSS の設計手法の妥当性を評価する。FSS は SiC 等のウェハーにフォトリソグラフィの手法により製作することを検討しており、これによりサブミリ波帯において必要な精度をもつ FSS が製造できることを実証する。

次に、Jerusalem Cross スロット型等の FSS はスロット形状による共振特性を利用しているため、単層では一般的に広帯域の透過特性を得ることができない。そこで、Jerusalem Cross スロット型 FSS を多層化することによる透過帯域を広帯域化について検討する。

(1) 直交偏波共用 Jerusalem Cross Slot アレイ(JCSA)型 FSS の設計

入射角 45°においてグレーティングローブを発生させずに垂直水平の直交両偏波共用特性をする FSS として JCSA 型の FSS に着

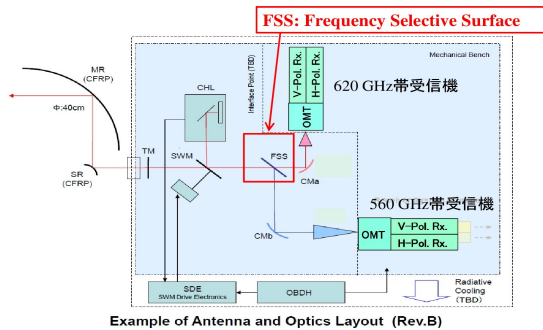


図1. サブミリ波分光放射計の構成の一例

目し, 600 GHz 帯のサブミリ波を選択的に透過する FSS の設計を行う。JCSA 型 FSS は導体板にスロットを二次元的に配列した構造を有し導体部分が一体となった構造であるため, 誘電体基板なしで自立 (free standing) した構造で構成できるため, サブミリ波帯で低損失な直交偏波共用 FSS を構成することが期待できる。設計はモーメント法による数値シミュレーションを用いて行い, 入射面に電界が平行な偏波(TM 波)と垂直な偏波(TE 波)における反射・透過特性が可能な限り一致するようにスロットの形状を最適化する。

(2) 直交偏波共用 JCSA 型 FSS の試作

上記の設計に基づき単層の JCSA 型 FSS を試作する。

(3) 直交偏波共用 JCSA 型 FSS の反射透過特性測定評価

試作した単層 JCSA 型 FSS について 500 GHz ~ 750 GHz の周波数帯における反射透過特性を実測し, 設計の妥当性を評価する。

(4) 直交偏波共用 Maltese Cross Slot Array(MCSA)型 FSS の設計

JCSA 型 FSS より広帯域な特性を実現できる可能性のある MCSA 型 FSS に着目し, 600 GHz 帯のサブミリ波を選択的に透過する FSS の設計を行う。設計はモーメント法による数値シミュレーションを用いて行い, 直交両偏波(TE, TM)における反射・透過特性が可能な限り一致するようにスロットの形状を最適化する。

(5) 直交偏波共用 MCSA 型 FSS の試作

上記の設計に基づき単層の MCSA 型 FSS を試作する。

(6) 直交偏波共用 MCSA 型 FSS の反射透過特性測定評価

試作した単層 MCSA 型 FSS について 500 GHz ~ 750 GHz の周波数帯における反射透過特性を実測し, 設計の妥当性を評価する。

(7) 多層化による広帯域化についての検討

上記で設計した JCSA 型および MCSA 型の FSS について, 2 層化することによる広帯域化の可能性について, 数値シミュレーションにより検討する。

4. 研究成果

(1) 直交偏波共用 JCSA 型 FSS の設計

500 GHz 帯と 600GHz 帯の直交両偏波を入射角 45°で反射・透過に分離するダイプレクサとして用いるための FSS として, 図 1 に示した構造の Jerusalem Cross Slot を単位セルとして x-y 方向に周期的に無限に配列した JCSA 型の FSS について, 640 GHz を透

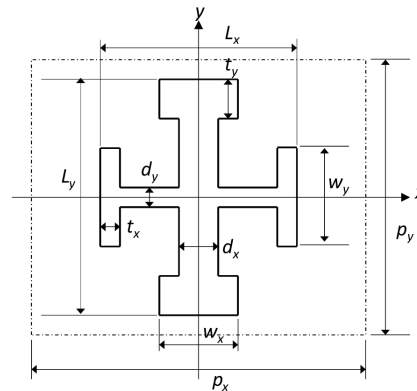


図 2 Jerusalem Cross Slot の単位セル

過中心周波数とするために, スロット形状と x 方向, y 方向の周期 p_x, p_y を, 試行錯誤に基づき, 以下のように設定した。

$L_x = 150 \mu\text{m}, L_y = 189 \mu\text{m}, W_x = 60 \mu\text{m}, W_y = 78.75 \mu\text{m}, d_x = 30 \mu\text{m}, d_y = 15.75 \mu\text{m}, t_x = 15 \mu\text{m}, t_y = 31.5 \mu\text{m}, p_x = 236 \mu\text{m}, p_y = 220.5 \mu\text{m},$

但し, 導体板の厚さは $2 \mu\text{m}$ の金とし, 導電率は $4.35 \times 10^7 \text{ S/m}$ とした。

この単層 FSS に y-z 面を入射面として, 入射角 45°で TE 波, TM 波が平面波で入射する場合の電力透過・反射係数をモーメント法により計算した結果を図 4 に“MOM”として示す。この図より, 45°斜入射においてほぼ偏波に依存しない特性を持つ設計となっていることが確認できる。

(2) 直交偏波共用 JCSA 型 FSS の試作

上記の設計に基づき単層の JCSA 型 FSS を試作した。試作した FSS は, Si 基板上に形成した $1.8 \mu\text{m}$ 厚の SiC 薄膜に, フォトリソグラフィーにより, 図 2 の JC パタンのスロットの二次元配列を形成し, Si 基板を取り除き, 約 5 nm のクロムをコートした上に約 $0.5 \mu\text{m}$ の金メッキ (600 GHz 帯での金の skin depth $0.1 \mu\text{m}$ より十分厚い) を施したものである。JCSA としての有効開口面は $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ であり, 136×127 個の JC スロットが配列されている。

(3) 直交偏波共用 JCSA 型 FSS の反射透過特性測定評価

試作した FSS の入射角 45°における複素反射係数と複素透過係数をベクトル・ネットワークアナライザにより測定した。測定光学系は 2 枚の回転双曲面鏡(Mp1, Mp2)と回転楕円

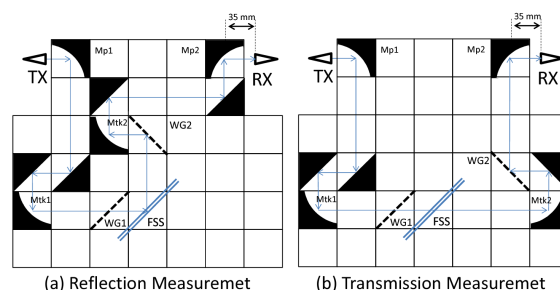


図 3 反射・透過係数測定用光学系

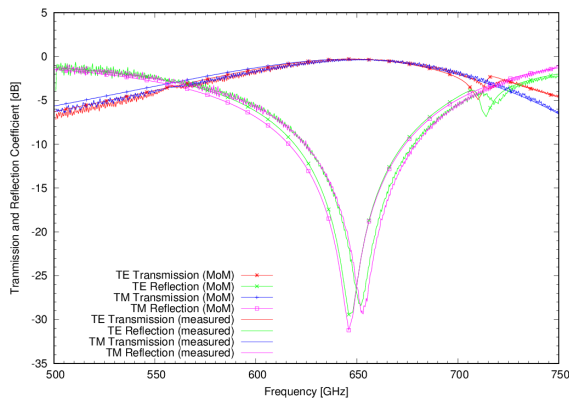


図4 JCSA型 FSS の反射・透過特性

鏡(Mtk1,Mtk2)と偏波選択用のワイヤグリッド(WG1,WG2)により集束ビーム伝送系を図3のように構成し,beam waistの位置にFSSを置いて反射,透過特性を測定した.

反射・透過係数の測定結果をモーメント法による計算結果(MoM)と比較して図4に示した.共振周波数が約7GHzズレていることを除いて実測値は計算値と非常に良く一致していることが確認できる.この共振周波数のズレが周波数比にして約1%程度であることは,FSSが1%程度以内の高い機械的精度で出来ていることを示している.

(4) 直交偏波共用 MCSA 型 FSS の設計

JCSA 型 FSS より広帯域な直交偏波共用 FSS を実現できる可能性のある FSS として,図5の-slot形状を持つ MCSA 型 FSS を提案した.ただし MCSA 型の場合その slot の形状のため誘電体基板を用いない自立型の場合,金属の内部応力による変形が問題になることが想定されたため,厚さ 2 μ m の誘電体基板状に MCS アレイを形成することとした. slot 形状は 600 GHz 帯を透過中心周波数とするために試行錯誤により図5のように設定した.計算では誘電体として SiN(比誘電率: 7.59 - j0.012)とし,導体は厚さ 0.2 μ m の金を仮定した.

この単層 FSS に y-z 面を入射面として,入射角 45°で TE 波, TM 波が平面波で入射する場合の電力透過・反射係数をモーメント法により計算した結果を図7に“MoM”として示す.この図より,45°斜入射においてほぼ偏

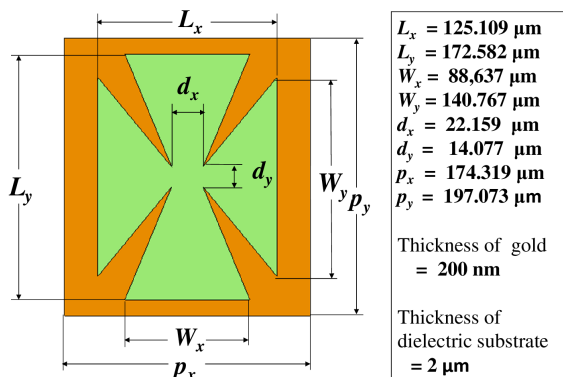


図5 Maltese Cross Slot の単位セル

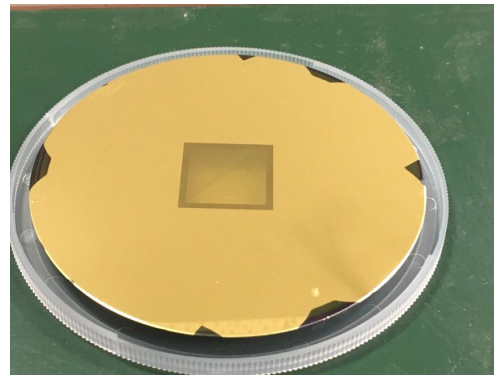


図6 試作した MCSA 型 FSS

波に依存しない特性を持つ設計となっていることが確認できる.

(5) 直交偏波共用 MCSA 型 FSS の試作

上記の設計に基づき単層の MCSA 型 FSS を試作した.試作した FSS は 2 μ m 厚の SiN 薄膜に,フォトリソグラフィーにより,0.2 μ m 厚の金の MCSA の slot パターンを形成したものであり,MCSA としての有効開口面は 20 mm \times 20 mm であり,114 \times 101 個の Maltese Cross が配列されている.試作した MCSA 型 FSS の写真を図6に示す.

(6) 直交偏波共用 MCSA 型 FSS の反射透過特性測定評価

試作した FSS の入射角 45°における複素反射係数と複素透過係数を(3)と同様の方法で測定した.透過・反射係数の測定結果をモーメント法による計算結果(MoM)と比較して図7に示した.実測値は計算値と非常に良く一致していることが確認でき,MoM による設計および FSS 試作が十分な精度でなされていることを示している.

(7) 多層化による広帯域化についての検討

(1)(4)で設計した JCSA 型および MCSA 型の単層 FSS を 2 層化することによる広帯域化についてモーメント法による数値シミュレーションによって検討した.シミュレーションの結果,2 層の層間間隔を,JCSA 型の場合 220 μ m, MCSA 型の場合 285 μ m とし

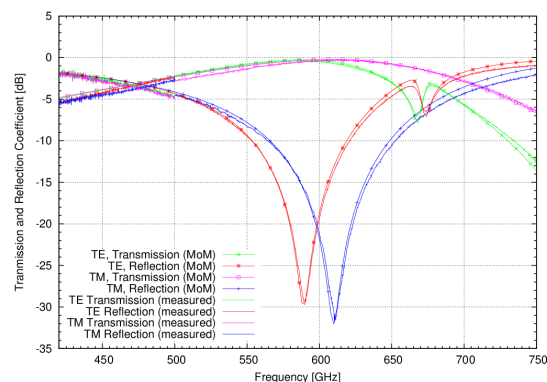


図7 MCSA 型 FSS の反射・透過特性

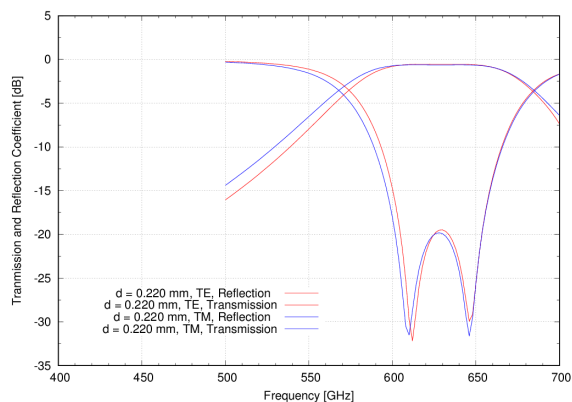


図 8 2 層 JCSA 型 FSS の反射・透過特性

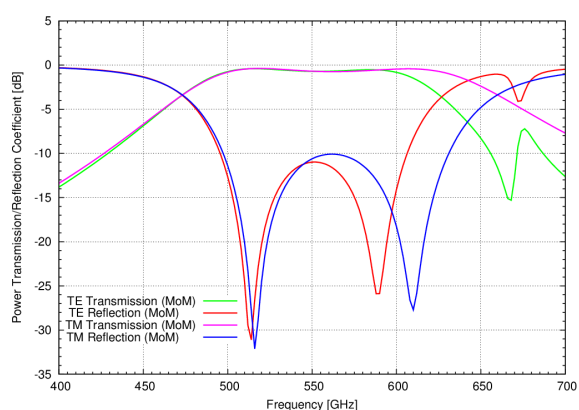


図 9 2 層 MCSA 型 FSS の反射・透過特性

た場合に最も通過帯域が広帯域となることが明らかとなった。図 8 および図 9 に JCSA 型および MCSA 型 FSS を 2 層化した場合の反射透過特性の計算結果をそれぞれ示す。FSS の 2 層化により FSS の透過帯域幅(@ -1dB)は JCSA 型の場合約 60 GHz になるのに対し、MCSA 型の場合は約 120 GHz となり、MCSA 型の方が JCSA 型に比べて約 2 倍の広帯域が実現できることがわかる。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 13 件)

T. Manabe, S. Ochiai, T. Nishibori, and K. Kikuchi, Maltese-Cross Slot-Array Type Frequency Selective Surface for a Submillimeter-Wave Band, 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), 2017 年。
 岡田望, 橋本育実, 高田勝太, 本間愛彩, 木村公洋, 千葉正克, 真鍋武嗣, 小川英夫, 大西利和, 南谷哲宏, 宮本祐介, 宮澤

和彦, 宮澤千栄子, 岸本直子, 水窪耕兵, 澤田・佐藤聡子, 今井裕, 野辺山 45m 電波望遠鏡搭載同時観測用周波数フィルタの開発, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年。

真鍋武嗣, 落合啓, 西堀俊幸, 菊池健一, Maltese-Cross Slot 型サブミリ波帯周波数選択板の試作と測定, 2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-63, 2017 年。

S. Ochiai, Y. Uzawa, Y. Irimajiri, P. Baron, T. Nishibori, T. Manabe, H. Maezawa, A. Mizuno, T. Nagahama, M. Suzuki, and M. Shiotani, Submillimeter-wave limb sounder, SMILES-2, for observation of the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere, 32nd URSI General Assembly, 2017 年。

岡田望, 橋本育実, 高田勝太, 本間愛彩, 高橋諒, 木村公洋, 千葉正克, 真鍋武嗣, 小川英夫, 大西利和, 南谷哲宏, 宮本祐介, 宮沢和彦, 齋藤雅夫, 岸本直子, 今井裕, 野辺山 45m 鏡搭載 20/40GHz 帯同時観測用周波数フィルタの開発, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年。

真鍋武嗣, 岡田望, 木村公洋, 小川英夫, 橋本育実, 千葉正克, 野辺山 45m 鏡 22GHz/43GHz 同時観測用 FSS の試作と特性評価, 第 17 回「ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ」および第 3 回「理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ」, 2017 年。

大西健吾, 真鍋武嗣, サブミリ波帯直交偏波共用 Maltese Cross Slot 型周波数選択板の特性の検討, 平成 28 年電気関係学会関西支部大会, 2016 年。

S. Ochiai, P. Baron, Y. Irimajiri, Y. Uzawa, T. Nishibori, T. Manabe, A. Mizuno, M. Suzuki, and M. Shiotani, A plan of submillimeter limb sounder for measurements of middle atmosphere, International Symposium on the Whole Atmosphere (ISWA), 2016 年。

落合啓, P. Baron, 鶴沢佳徳, 入交芳久, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, 水野亮, 鈴木睦, 塩谷雅人, サブミリ波帯衛星リムサウンディングによる中層大気観測の構想, 日本気象学会 2016 年度春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2016 年。

今井裕, 小川英夫, 真鍋武嗣, 木村公洋, 南谷哲宏, 野辺山 45m 鏡への多波長バンド同時観測システム導入, 2015 年度 VLBI 懇談会シンポジウム, 2015 年。

T. Manabe, K. Kikuchi, S. Ochiai, and T. Nishibori, Dual-polarization Jerusalem-cross slot type FSS for a submillimeter-wave band, 2015 International Symposium on Antennas

and Propagation (ISAP2015), 2015 年.
S. Ochiai, Y. Uzawa, Y. Irimajiri, P.
Baron, T. Nishibori, T. Manabe, A.
Mizuno, T. Nagahama, Y. Fujii, M.
Suzuki, M. Shiotani, Planned
submillimeter limb sounder
(SMILES-2) for measurement of
temperature, wind, and chemical
species in the middle atmosphere,
SPIE Remote Sensing 2015
(Conference RS103: Sensors, Systems,
and Next-Generation Satellites), 2015
年,
笠井康子, 関根康人, 黒田剛史, 佐川英
夫, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, JUICE-SWI サ
ブミリ波分光計, 日本地球惑星科学連合
2015 年大会, 2015 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

真鍋 武嗣 (MANABE TAKESHI)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号： 50358991

(2)研究分担者

落合 啓 (OCHIAI SATOSHI)
国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁
波研究所リモートセンシング研究室・総括
研究員
研究者番号： 70358993

西堀 俊幸 (NISHIBORI TOSHIYUKI)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機
構・研究開発部門・研究領域主幹
研究者番号： 80280361