

7-2 国際宇宙ステーション搭載サブミリ波サウンダ I : 較正処理

7-2 *Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder onboard International Space Station I: Calibration Processing*

落合 啓 西堀俊幸 尾関博之 菊池健一 真鍋武嗣

OCHIAI Satoshi, NISHIBORI Toshiyuki, OZEKI Hiroyuki, KIKUCHI Ken'ichi, and MANABE Takeshi

要旨

国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) は、625, 650 GHz 帯で大気リムからの放射を高感度に受信し精度良くスペクトルを得ることにより、大気中の微量物質等の濃度分布を計測することができる。本論では、SMILES においてリム放射スペクトルを較正するのに用いている処理アルゴリズムについて概要を述べる。

Superconducting Submillimeter-wave Limb-Emission Sounder, SMILES, to be aboard the International Space Station has the ability to observe vertical profiles of atmospheric minor constituents by receiving limb-emission spectra from the atmosphere with its high sensitivity and precision in the 625- and 650-GHz bands. In this paper, we describe the outline of the calibration algorithm on limb-emission spectra observed by the SMILES.

【キーワード】

SMILES, 大気リモートセンシング, 国際宇宙ステーション, センサ較正, サブミリ波 SMILES, Atmospheric remote sensing, International Space Station, Sensor calibration, Submillimeter wave

1 まえがき

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (Superconducting Submillimeter-wave Limb-Emission Sounder, SMILES) [1]–[3] は、国際宇宙ステーションの日本実験棟 (Japanese Experiment Module, JEM)「きぼう」の船外実験プラットフォーム (ばく露部) に搭載する地球大気観測センサーで、2009 年ごろの打ち上げが計画されている。SMILES は、JEM ばく露部に搭載された後、軌道上で 1 年間運用されて、北緯約 65 度から南緯約 38 度までの、主に成層圏高度の大気観測を行う予定である。SMILES では、624.32–626.32 GHz と 649.12–650.32 GHz の二つの周波数帯を約 1.4 MHz の分解能で分光しながら、大気のリム方

向からの放射を高度方向にスキャンを行いながら受信する。これにより、成層圏から中間圏の O_3 , HCl, ClO, HOCl, HO_2 , HNO_3 , CH_3CN , BrO 等の高度分布を導出が可能となる。

リムスペクトル観測では、大気分子からの放射スペクトルの強度、周波数、スペクトル形状とともに、観測位置を精度良く求めることが必要である。SMILES でこれらの観測値が、ミッション目的を達成するために必要な仕様要求を満たすようにするため、較正処理が必要である。SMILES の特徴は、超伝導ミキサを宇宙で初めて使用することにより高感度な受信を行うことである。高感度受信により、受信スペクトル強度のランダム誤差は減少することが期待される。SMILES の較正処理では、小さいランダム誤差に対応して、強度の絶対

値精度の高いことが要求される。

NICT では、SMILES と同じ周波数帯を用いた大気球搭載リモサウンダ[4][5]を開発し、較正処理、分子濃度導出を実証した[6]。米国の Aura 衛星の MLS は、その較正処理のアルゴリズムを公開している[5][6]。SMILES では、SMILES 低次データ処理部を、JAXA と NICT で構成する SMILES ミッションチームが開発した。SMILES 低次データ処理部について、SMILES ミッションチームでは、較正処理のアルゴリズムを詳述した文書を作成し、SMILES 運用開始後のデータ公開時にはその文書も公開する予定である。本稿では、SMILES 低次データ処理部における較正処理アルゴリズムの概要について述べる。

2 SMILES の較正処理

SMILES のデータは、処理の段階ごとに、較正輝度温度データ (Level 1B)、軌道に沿った微量分子等の高度分布データ (Level 2)、全球マップ等の高次処理データ (Level 3) に分けられる。SMILES 観測装置に依存する観測データの較正処理は、Level 1 処理と Level 2 処理に係る。Level 2 では、アンテナポインティングのオフセット較正、ビームパターン、受信機のサイドバンド抑圧比の測定値を使ってリモ放射スペクトルの解析が行われるが、観測装置に関する主要な較正は Level 1 で実施され、Level 1 のプロダクトとして較正された輝度温度スペクトルを得る。ここでは、Level 1B 処理で実施される放射スペクトル強度、周波数、スペクトル形状、観測位置の情報についての較正処理について概説する。

2.1 SMILES ペイロード

SMILES 受信機は、624.32–626.32 GHz と 649.12–650.32 GHz の二つのバンドの SIS ミキサを持つ。SIS 受信機の SSB システム雑音温度は 500 K 程度である。二つのバンドに共通の 637.32 GHz のローカル発振器を使用している。アンテナからの受信信号は、準光学系により上側波帯の 649.12–650.32 GHz (USB) と下側波帯の 624.32–626.32 GHz (LSB) に分離して、それぞれの SIS ミキサに供給される。アンテナは 400 × 200 mm の楕円開口を持つオフセットカセグレン

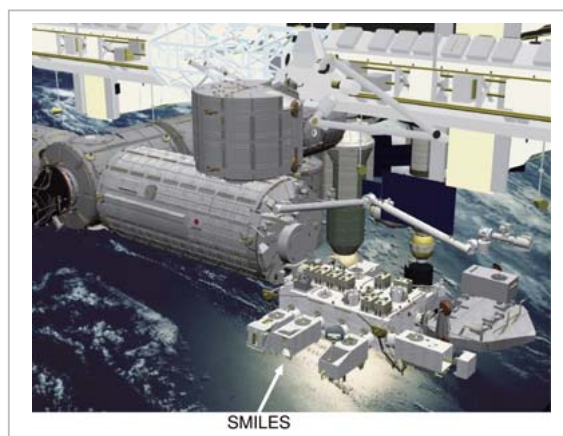


図1 国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」と SMILES の完成想像図

SMILES は 2009 年夏頃「きぼう」に搭載される予定。図は JAXA 提供。

で、地球大気の接線高度 -35 km から接線高度 160 km 以上の範囲で、ビームをエレベーション方向に振り、大気リモ放射の受信と、低温較正源としての宇宙背景放射の受信を行う。観測点 (tangent point) でのビームの鉛直方向の幅は 3.3 km 程度である。さらに、SMILES 内部の常温較正源による較正と、分光計の周波数較正を行い、合計 53 秒で、一単位の観測周期を完了するように設計されている。分光計には、周波数分解能 1.4 MHz、周波数チャンネル間隔 0.8 MHz、チャンネル数 1728、バンド幅約 1.2 GHz の音響光学型分光計を 2 台備えていて、受信バンドの中から分光計へ入力する帯域を選択するようになっている。SMILES の搭載される国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の想像図を図 1 に示す。SMILES ペイロードについては、参考文献 [1]–[3] で更に詳しく書かれている。

2.2 国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーション (ISS) は、1998 年に最初のモジュールが打ち上げられて以来、国際協力による建設が続けられている。ISS は軌道傾斜角 51.6° の、太陽非同期、地上からの高度は、図 2 のようにおよそ 320–420 km で、ほぼ円軌道上にあり、1 日の周回数は 15.6–15.8 回で、91–92.5 分で地球を 1 周している [9]。ISS の高度、ノミナル姿勢は、ISS の組立途上のコンフィギュレーションによって異なる。姿勢の変動幅については、実績値の情報は入手できていないが、

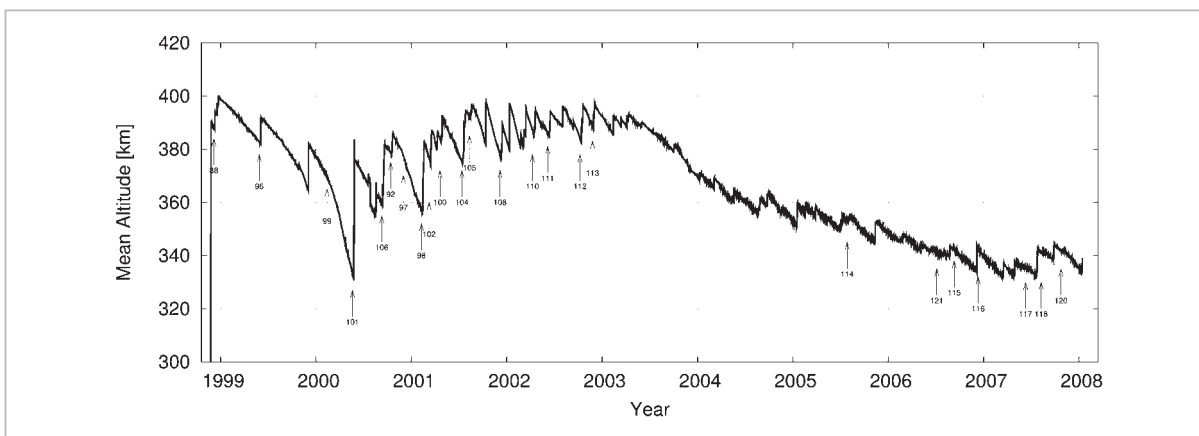


図2 ISSの平均高度

ISSの軌道半径の平均から地球の赤道半径を引いた値。図中の矢印はmissionがISSであるspace shuttleの打ち上げ日を示す[9]。

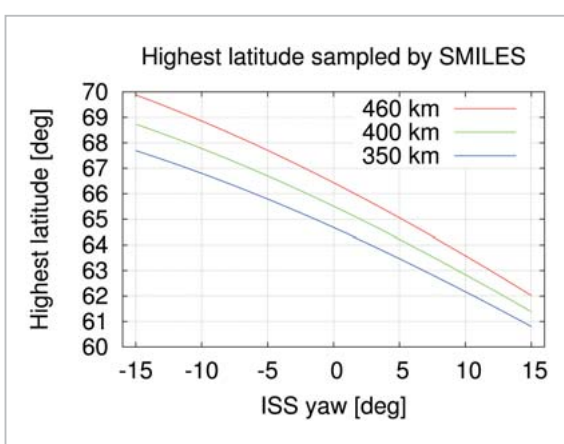


図3 SMILESの観測する北限の緯度

SMILESの観測緯度範囲は、ISSの姿勢と高度による。姿勢の関数として観測北限緯度を示す。

仕様では $\pm 3.5^\circ$ の範囲に維持される。SMILESで観測できる緯度範囲は、ISSの姿勢と高度によって、 $0\sim 4^\circ$ 程度、南北方向に移動し、観測緯度の北限は図3に示すような範囲になる。

2.3 SMILES 低次データ処理部

SMILESのミッションデータは、ISSの中速系(Ethernet)に送られ、ISSから中継衛星を介して地上へ転送される。中速系では、図4にある2経路を選択して地上へデータを送信することができる。JAXAの施設内に設置されるSMILES実験運用管理部では、SMILESからのテレメトリを受け、SMILESへコマンドを送る機能を有していて、

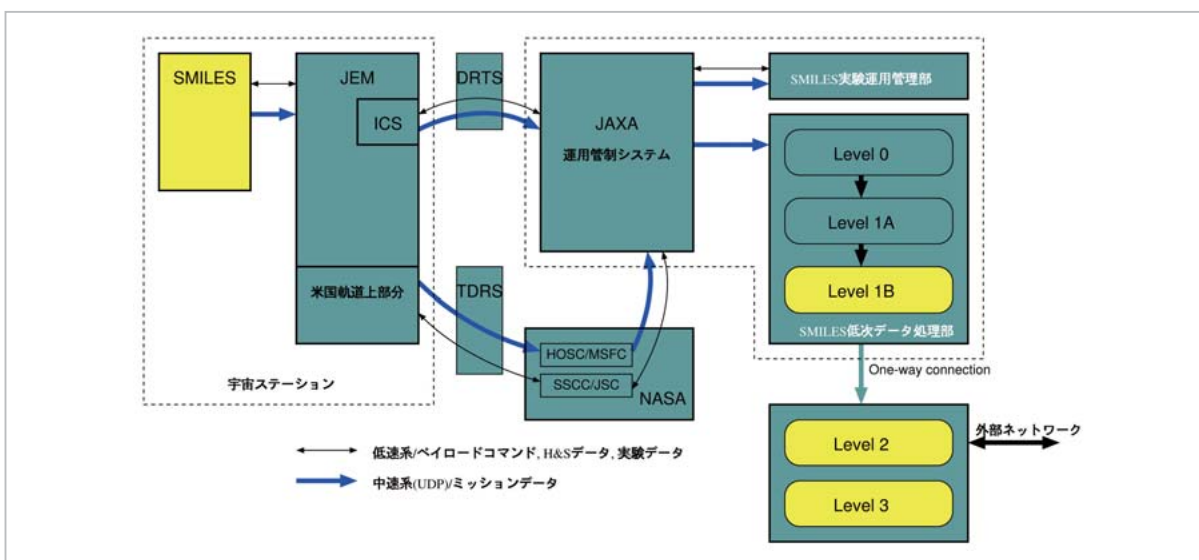


図4 観測データの流と SMILES データ処理運用施設

JEMとの通信はJAXAのデータリレー衛星DRTSを経由する経路と、NASAのTDRS衛星を経由する経路があり、通常の中速系データ通信はDRTS経路で行われる。

これにより SMILES の運用を行う。SMILES 低次データ処理部では、中速系から送られてくるミッションデータを解析し、Level 0, Level 1A, Level 1B データを作成し、蓄積する(図 4)。実験運用管理部、低次データ処理部の施設は、外部のネットワークとはオンラインで接続されないの、低次データ処理部で生成したデータは、1日に1度程度の頻度で、オペレータがオフラインで、外部ネットワークに接続された機器にデータを転送する予定となっている。Level 2 以降の処理は、外部ネットワークに接続された設備で行われる。

2.4 SMILES Level 1 処理と Level 2 処理のインタフェース

Level 1 データは、リム放射の輝度温度スペクトルであり、Level 2 処理では、輝度温度スペクトルから分子濃度の高度分布等を導出する。

理想的なリム放射輝度温度スペクトルとは、観測位置が正しく分かっているペンシルビーム観測による、イメージサイドバンドの混入がない、十分詳細な周波数分解能の、周波数や強度の歪みやバイアスのないスペクトルであるので、Level 1 出力をなるべくそれに近い条件の値にするほど、Level 2 以降の処理が容易となる。実際には、理想的なリム放射輝度温度を求めるのは困難であるので、理想的なスペクトルに、あるスムージングをかけた値を Level 1 出力とし、スムージング関数を Level 2 処理のために示しておく方法が現実的である。したがって、観測位置についての空間的なスムージングと、周波数軸についてのスムージングされたスペクトルが Level 2 以降の処理に渡されることになる。アンテナポインティングのオフセットや、ドップラシフトによる周波数のオフセットについても、広い意味でスムージングの一つとここでは考えることにする。

表 1 に、Level 1 で処理される項目と、Level 1 の出力として Level 2 以降の処理に渡されるスムージング関数の項目について整理した。すなわち、アンテナビームパターン、アンテナポインティングのオフセット、分光計の周波数応答関数、サイドバンド抑圧比の関数、ドップラシフトによる周波数オフセットが、Level 2 以降の処理に渡されるスムージング関数であり、その他の項目は、Level 1 処理で較正される。

表 1 Level 1 と Level 2 のインタフェース

補正の必要な項目	Level 1B 処理	Level 2 以降へわたす値
アンテナビームパターン (ビーム中心から $ A_{cl} , E_{cl} \leq 4.2^\circ$)	スペクトルに補正は加えない	地上試験で得られたアンテナビームパターン。Tangent point に投影した elevation 軸と水平線の間の傾き。Tangent point と SMILES の距離
アンテナビームパターン ($ A_{cl} , E_{cl} > 4.2^\circ$)	$\pm 4.2^\circ$ の範囲外からの入射の寄与分を求め、ベースラインのオフセットとして補正する。	参考値として補正したオフセット値
アンテナ系 (主鏡、副鏡、第 3 鏡 (RM1)) による損失	地上試験による鏡面損失の値、アライメント誤差等から損失を見積り、 $\pm 4.2^\circ$ の範囲外の寄与分と同様に、ベースラインオフセットとして補正する。	参考値として補正したオフセット値
アンテナポインティング	SMILES の姿勢とアンテナ仰角から Tangent point の高度、緯度、経度を求める	地球の曲率半径、参考として Tangent point の高度、緯度、経度、アンテナ仰角
アンテナポインティングオフセット	地上試験で得られた値を基にしたオフセット値を補正	参考値として補正したオフセット値
常温較正源 (CHL) の温度と定在波	CHL の測定温度から求めた輝度温度を使用。	参考値として CHL の物理温度
長周期利得変動	1 スキャン (53 秒) に 1 セットずつ測定する常温較正と低温較正について、7 スキャン分のデータから補間した値を用いて長周期の変動分を除去する	長周期利得変動補正を施したことを示すフラグ
分光計のチャンネル-周波数対応	分光計各チャンネルに対して、分光計 IF 周波数を与える	各チャンネルの周波数と、3 次多項式によるフィット式
分光計の周波数応答特性	スペクトルに補正は加えない	地上試験で得られた周波数応答関数
長周期周波数変動	分光計の性能から補正不要なのでなにもしない	なし
サイドバンド補正	スペクトルに補正は加えない	地上試験で得られたサイドバンド抑圧比
ISS の動きによるドップラシフト量	スペクトルに補正は加えない	観測位置での視線方向対地速度
太陽電池パドル・月・太陽直視時の処理	メインビームが太陽電池パドル・月・太陽を直視した場合、イメージ終端 (CST) が太陽直視した場合にフラグをつける。なお、メインビームが太陽を直視する場合はあらかじめ受信機を保護するようにしている	太陽電池パドル・月・太陽直視のフラグ

2.5 輝度温度較正

SMILES のアンテナ光学系のブロック図を図 5 に示す。SMILES の主鏡 (MR) は 400×200 mm の楕円開口を持ち、オフセットカセグレン系になっている。第 3 鏡 (RM1) と第 4 鏡 (RM2) の間にスイッチングミラー (SWM) を設け、常温較正源 (CHL) の信号を周期的に導入し較正を行うようにしている。図の ALP は SMILES の構体 (筐体) の一部で、国際宇宙ステーションの電磁環境中からの電磁シールドの役割も持っている。常温光学系 (AOPT) は構体の中で更に電磁シールドされた箱になっていて、AOPT 内に入るサブミリ波の経路には、オーバーサイズ導波管である back-to-back horn (BBH) を用いて、26.5 GHz 以下の電磁波に対しては 40 dB 以上のシールド性能を持つようにしている。AOPT 内では、SMI により円偏波-直線偏波の変換を行い (図の ANT-TRN-SRX-COPT 間の反射を減らす目的)、SMILES 用に開発した干渉型のサイドバンド分離フィルタ (FSP) により、シグナルバンドとイメージバンドで偏波を 90° 変換する。冷却光学系 (COPT) では、ワイヤグリッ

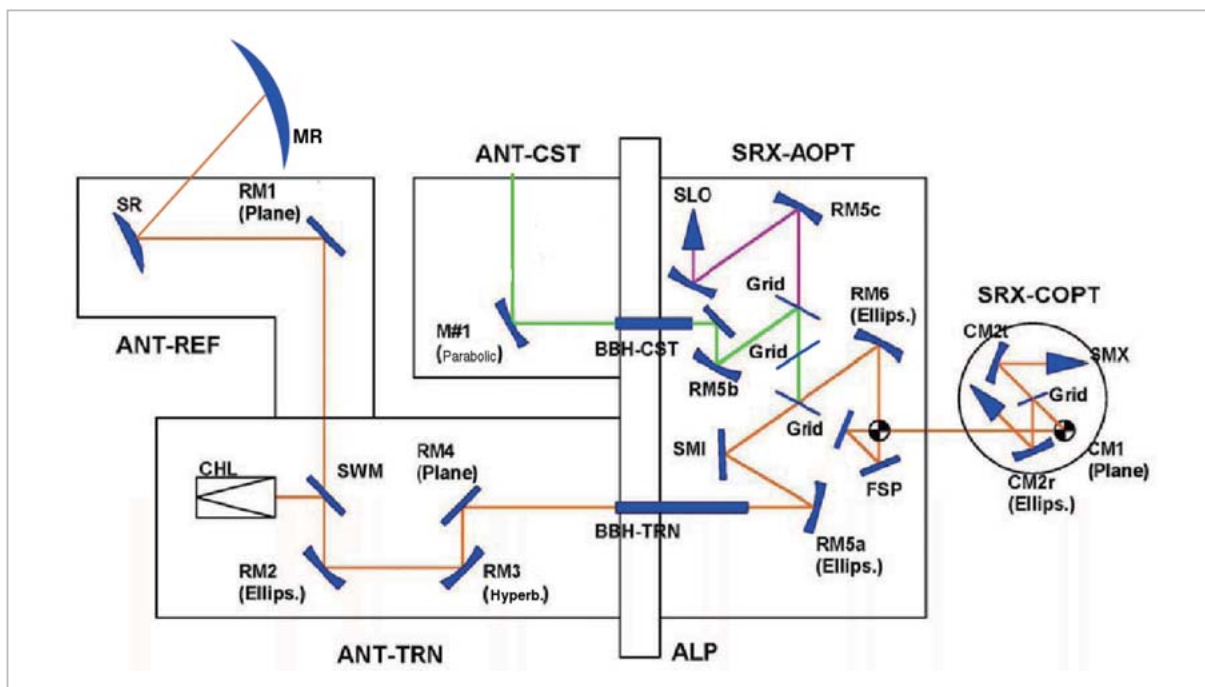


図5 SMILES アンテナ光学系のブロック図

大気からのリム放射は 40 cm×20 cm の楕円開口パラボラ面の主鏡 (MR) で受信し ANT-REF, ANT-TRN, BBH-TRN, SRX-AOPT, SRX-COPT の光学系を通して、二つの超伝導ミキサ (SMX) へ導かれる。詳しくは本文を参照。なお、ANT-CST 内にミラーは M#1 だけであり、文献[3] 図2の M#2 は誤り。

ドにより、USB と LSB に分けられた偏波を分離して、二つの超伝導ミキサ (SMX) にそれぞれ信号を導く。どちらのミキサに加わるイメージバンドの信号も、ANT-CST から入力される。イメージバンド終端 (CST) のビームは、SMILES から天頂方向の深宇宙を見るようになっている。CST からのイメージバンドの信号の一部に、AOPT 内でローカル信号のサブミリ波局部発振器 (SLO) の 637.32 GHz が加えられる。

大気からの放射輝度温度は、宇宙背景放射 (2.7 K) と大気温度 (~300 K) の間のレベルであるので、宇宙からの放射 (2.7 K) と、SMILES 内部に持つ 300 K 程度の常温較正源 (CHL) からの二つの放射を、既知温度として、大気からの放射輝度温度を決定する。低温較正とする宇宙からの放射は、主鏡を接線高度 160 km 以上の方向に向けることで受信する。主鏡を上方へ向けて低温較正することで、鏡の反射における損失や、ビームの漏れ、不要な散乱等による較正誤差を避けることができるが、大気の影響がわずかに残ることに注意する必要がある。高温較正は CHL を用いるので、主鏡系とは経路が違って、大気を観測するときは、主鏡、副鏡、第 3 鏡の 3 枚に対して、高温較正時

はスイッチングミラーで反射して CHL を見るという違いがあることに注意する必要がある。

輝度温度の較正を行うときには、アンテナのサイドローブで拾う輝度についての補正が必要である。ビーム効率が 90% のアンテナであっても、メインビーム以外からの寄与を適切に較正しないと、受信強度に 10% 以上の誤差が残ることになる。SMILES 主鏡ビームは、半値幅で、仰角方向に 0.09°、方位角方向に 0.18° であり、サイドローブレベルは -20 dB 以下である。半値幅の 2.5 倍の立体角を定義域としたビーム効率は 90% 程度である。SMILES では、BBH 前面のビーム放射パターンを求めたのと同様に、主鏡からのビームパターンを、Phase retrieval 法を用いた近傍界測定により求める [10]。測定によりビームパターンの求められる立体角の範囲は ±4.2° で、その中にビームのおよそ 97.5% が入る。±4.2° の範囲からアンテナに入射する受信電力を輝度温度で表示して T_{mb} とすると、

$$T_{mb} = \int_{\Omega_{mb}} GT(\theta, \phi) \quad (1)$$

と表される。ここで、 G は地上試験で測定されたアンテナビームパターン、 $T(\theta, \phi)$ は、仰角 θ 、方位角 ϕ の方向からの入射する放射の輝度温度、 Ω_{mb} は、 G のビーム中心方向から $\pm 4.2^\circ$ の立体角の範囲である。ここで、物理温度 T の黒体からの放射をビーム効率 1 のアンテナで受信した電力を輝度温度で表示した値 T^* を

$$T^* = \frac{hf}{k} \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \quad (2)$$

と定義する。ただし f は周波数、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数。

Ω_{mb} 以外の方向から入射する放射は、おおまかに、深宇宙からの放射、地球からの放射、SMILES 構体等からの放射に分類することができる。それぞれからの寄与の割合を、 η_{space} 、 η_{earth} 、 η_{body} とし、放射の輝度温度を、それぞれ、 T_{space}^* 、 T_{earth}^* 、 T_{body}^* とすると、アンテナに入力する全電力 T_a は、

$$T_a = \eta_{mb} T_{mb} + \eta_{space} T_{space}^* + \eta_{earth} T_{earth}^* + \eta_{body} T_{body}^* \quad (3)$$

と表すことができる。ただし、 η_{mb} は、 Ω_{mb} に含まれるビームの割合である。

$\eta_{mb} \approx 0.975$ であるので、 $\eta_{space} + \eta_{earth} + \eta_{body} \approx 0.025$ である。後者の内訳は、観測時の仰角、SMILES の姿勢等によって変わるが、およそ、 $\eta_{earth} \sim 0.0015$ 、 $\eta_{body} \sim 0.022$ である。 η_{earth} 、 η_{body} の値は、仰角、姿勢から幾何学的に求めて補正することも考えられる。 T_{space}^* の値は、SMILES の観測周波数ではほぼ 0 K としてよいが、 T_{earth}^* 、 T_{body}^* の値には適当な仮定値を用いることにしている。

主鏡に入射する電力 T_a のうち、第 4 鏡 (RM2) に届く電力 T_{RM2} は、主鏡、副鏡、第 3 鏡 (RM1) のジュール損による効率 η_{MR} 、 η_{SR} 、 η_{RM1} がかかるので、

$$T_{RM2} = \eta_{MR} \eta_{SR} \eta_{RM1} T_a + (1 - \eta_{MR} \eta_{SR} \eta_{RM1}) T_{mirror}^* \quad (4)$$

となる。ただし、主鏡、副鏡、第 3 鏡とも同じ物

理温度と仮定し、その輝度温度を T_{mirror}^* とする。 η_{MR} 、 η_{SR} 、 η_{RM1} は、およそ 0.997 の程度であるはずだが、SMILES の主鏡等に使用している材料と同じ表面処理を施した試験片について、ジュール損失の実測を行い得られた値を用いる予定である。主鏡、副鏡、第 3 鏡の損失としては、ジュール損失以外に、鏡面誤差による損失、鏡面エッジの回折による損失、スピルオーバーによる損失などがあるが、ここでは、主鏡の広角ビームパターンの中の内、構体を見る割合の中に入れて考えるものとする。

低温較正時に、第 4 鏡に届く電力 T_{RM2}^{cold} は、主鏡の仰角が変わっているだけであるので、式 (3) (4) と式の形は全く同じである。

$$T_{RM2}^{cold} = \eta_{MR} \eta_{SR} \eta_{RM1} T_a^{cold} + (1 - \eta_{MR} \eta_{SR} \eta_{RM1}) T_{mirror}^* \quad (5)$$

$$T_a^{cold} = \eta_{mb} T_{space}^* + \eta_{space}^{cold} T_{space}^* + \eta_{earth}^{cold} T_{earth}^* + \eta_{body}^{cold} T_{body}^* \quad (6)$$

ここで、 Ω_{mb} に届く放射は、宇宙背景放射のみと仮定した。また、大気リム観測時と、アンテナ仰角が異なるので、 η_{space} 、 η_{earth} 、 η_{body} は、それぞれ別の値、 η_{space}^{cold} 、 η_{earth}^{cold} 、 η_{body}^{cold} とした。

常温較正源 (CHL) による較正時の、第 4 鏡に届く電力 T_{RM2}^{hot} は、

$$T_{RM2}^{hot} = \eta_{SWM} T_{CHL}^* + (1 - \eta_{SWM}) T_{SWM}^* \quad (7)$$

のように表される。ここで、 η_{SWM} はスイッチングミラーの効率、 T_{CHL}^* は CHL の輝度温度、 T_{SWM}^* はスイッチングミラーによる損失分に加わる等価な輝度温度である。

常温較正源 (CHL) からの反射は -60 dB 以下であり [12]、ミキサ側の反射を -20 dB とすると、常温較正源測定時の、光学系に生じる定在波による測定輝度温度の振幅は 3×10^{-6} K 程度と見積もられ、無視することができる。

サブミリ波受信機の第 4 鏡入力換算システム雑音温度を T_{sys} 、音響光学型分光計 (AOS) の出力に至るまでの受信機の総合利得を G_{sys} 、AOS の出力のオフセットを V_0 とする。それらが較正を行う期間中不変であるとする、大気リム観測時 (Limb)、低温較正時 (Cold)、高温較正時 (Hot) の AOS 出

力、 V_{Limb} 、 V_{Cold} 、 V_{Hot} は、

$$V_{\text{Limb}} = \{T_{\text{RM2}} + T_{\text{sys}}\} G_{\text{sys}} + V_0 \quad (8)$$

$$V_{\text{Cold}} = \{T_{\text{RM2}}^{\text{cold}} + T_{\text{sys}}\} G_{\text{sys}} + V_0 \quad (9)$$

$$V_{\text{Hot}} = \{T_{\text{RM2}}^{\text{hot}} + T_{\text{sys}}\} G_{\text{sys}} + V_0 \quad (10)$$

で表される。相対リムスペクトル R_{CAL} を

$$R_{\text{CAL}} = \frac{V_{\text{Limb}} - V_{\text{Cold}}}{V_{\text{Hot}} - V_{\text{Cold}}} \quad (11)$$

で定義すると、式 (3) ~ (11) より、

$$T_{\text{mb}} = \frac{1}{\eta_{\text{MR}}\eta_{\text{SR}}\eta_{\text{RM1}}\eta_{\text{mb}}} \{ \eta_{\text{CHL}}\eta_{\text{SWM}}T_{\text{CHL}}^* + (1 - \eta_{\text{SWM}})T_{\text{SWM}}^* - \eta_{\text{MR}}\eta_{\text{SR}}\eta_{\text{RM1}} (\eta_{\text{mb}}T_{\text{space}}^* + \eta_{\text{space}}^{\text{cold}}T_{\text{space}}^* + \eta_{\text{earth}}^{\text{cold}}T_{\text{earth}}^* + \eta_{\text{body}}^{\text{cold}}T_{\text{body}}^*) - (1 - \eta_{\text{MR}}\eta_{\text{SR}}\eta_{\text{RM1}})T_{\text{mirror}}^* \} R_{\text{CAL}} + (12)$$

$$\frac{1}{\eta_{\text{mb}}} \{ (\eta_{\text{mb}} + \eta_{\text{space}}^{\text{cold}} - \eta_{\text{space}})T_{\text{space}}^* + (\eta_{\text{earth}}^{\text{cold}} - \eta_{\text{earth}})T_{\text{earth}}^* + (\eta_{\text{body}}^{\text{cold}} - \eta_{\text{body}})T_{\text{body}}^* \}$$

が得られる。式 (12) を用いて Level 1 処理では較正済輝度温度を求める。

2.6 サイドバンド比

SMILES では AOPT 内の 2 枚の FSP によりサイドバンド分離を行う (図 5 参照)。SMILES の初段のミキサ (SMX) では、受信信号と 637.32 GHz のローカル信号を入力とし、11-13 GHz の中間周波信号を出力とする。SMX-T (CM2t を経由して受信する SMX) には、主に LSB の 624.32-626.32 GHz の信号が、SMX-R (CM2r を経由して受信する SMX) には、主に USB の 649.12-650.32 GHz の信号が加わるようにしている。FSP の原理等の詳細については文献 [11] を参照されたい。

光学系による損失はここでは考えないものとして、光学系によるサイドバンド分離特性を次のように考える。LSB の信号が、SMX-R へ伝送される割合を $R^{\text{LSB}}(f)$ 、SMX-T へ伝送される割合を、 $1-R^{\text{LSB}}(f)$ 、また、USB の信号が、SMX-R へ伝送される割合を $1-R^{\text{USB}}(f)$ 、SMX-T へ伝送され

る割合を、 $R^{\text{USB}}(f)$ とする。ただし $R^{\text{LSB}}(f)$ 、 $R^{\text{USB}}(f)$ は周波数 f の関数である。

サイドバンド比は光学系の特性だけでなく、ミキサの特性にもよる。SMILES では、AOPT 単体のサイドバンド比の測定と、AOPT と SMX (COPT) を組み合わせた場合のサイドバンド特性の測定を行っている。AOPT と SMX を組み合わせたサイドバンド抑圧比は、AOPT 単体のサイドバンド抑圧比と、1~2 dB 程度しか変わらないはずであるので、ここでは、AOPT 単体のサイドバンド分離特性だけを示す。このとき、 $R^{\text{LSB}}(f)$ 、 $R^{\text{USB}}(f)$ は、

$$R^{\text{LSB}}(f) = m^{\text{LSB}}(f - f_0^{\text{LSB}})^2 + a^{\text{LSB}} \quad (13)$$

$$R^{\text{USB}}(f) = m^{\text{USB}}(f - f_0^{\text{USB}})^2 + a^{\text{USB}} \quad (14)$$

と近似して表すことができる。AOPT の物理温度が t °C、周波数が f GHz のとき、各パラメータは次の値になる。

$$m^{\text{LSB}} = 0.00398 \quad (15)$$

$$f_0^{\text{LSB}} = -2.888012 \times 10^{-4}t^2 + 0.0253396t + 624.75733 \quad (16)$$

$$a^{\text{LSB}} = -2.90103 \times 10^{-7}t + 0.00003150 \quad (17)$$

$$m^{\text{USB}} = 0.00470 \quad (18)$$

$$f_0^{\text{USB}} = 0.0085865t + 648.75572 \quad (19)$$

$$a^{\text{USB}} = -3.30717 \times 10^{-7}t + 0.00006756 \quad (20)$$

Level 1 処理では、サイドバンド特性については補正を行わず、そのままスペクトルを Level 2 以降の処理に渡す。したがって、Level 1 出力の SMX-R のスペクトル (Band C) は、 $R^{\text{LSB}}(f)$ 倍した LSB の大気スペクトルと、 $1-R^{\text{USB}}(f)$ 倍した USB の大気スペクトルの和であり、SMX-T のスペクトル (Band A 及び Band B) は、 $1-R^{\text{LSB}}(f)$ 倍した LSB の大気スペクトルと、 $R^{\text{USB}}(f)$ 倍した USB の大気スペクトルの和である。

2.7 ゲイン変動補正補間処理

SMILES では、53 秒の周期を 1 スキャンとして観測を行う。Level 1 のデータも 53 秒のデータを一つのファイルとして生成する。53 秒の 1 スキャンのうち最初の 30.5 秒は大気のリムを、接線高度 -35 km から 80 km 程度 (83-102 km) までを観測し、その後、接線高度 160 km 以上の低温較正、AOS の周波数較正、CHL を用いた高温較正を行う [3]。

リム観測と、低温・高温較正には時間差のあることから、受信機のゲイン変動が誤差の要因になる。受信機ゲイン変動の主たる原因は温度変化だが、その変化は遅いので、53 秒より長い周期のゲイン変動分を取り除くことが重要である。

AOS からの出力データを、 $V(i, j, ch)$ とおく。ここで i はスキャン番号 (53 秒単位)、 j は 1 スキャン内のデータユニット番号で、SMILES では、0.5 秒ごとに 1 スペクトルデータを取得するので $0 \leq j \leq 105$ の範囲をとり得る。 ch は分光計のチャンネル番号で 1728 チャンネルあり $0 \leq ch \leq 1727$ である。AOS のダークカウント分 $V^{\text{dark}}(ch)$ を引いたスペクトルを $A(i, j, ch) (=V(i, j, ch) - V^{\text{dark}}(ch))$ とする。 $i=i_0, j=j_0$ の時刻に対して内挿した Hot と Cold のスペクトルを得る場合を考える。 i_0-3 から i_0+3 までのスキャンのうち Hot 及び Cold のデータユニットそれぞれについて、全チャンネルの平均カウント $A_H^{\text{av}}(i, j)$ 、 $A_C^{\text{av}}(i, j)$ を求める。SMILES のスキャンのパターンでは、低温較正のデータユニット番号が 68~75、高温較正のデータユニット番号が 81~88 であるので、

$$A_H^{\text{av}}(i, j) = \frac{\sum_{ch=0}^{1727} A(i, j, ch)}{1728}, j = 81, \dots, 88 \quad (21)$$

$$A_C^{\text{av}}(i, j) = \frac{\sum_{ch=0}^{1727} A(i, j, ch)}{1728}, j = 68, \dots, 75 \quad (22)$$

である。 $A_H^{\text{av}}(i, j)$ と $A_C^{\text{av}}(i, j)$ は、それぞれ 56 個の値があるので、これから内挿して、 $i=i_0$ の $j=j_0$ の時刻に対応する Hot と Cold の平均カウントデータ $A_H^{\text{av}}(i_0, j_0)$ 、 $A_C^{\text{av}}(i_0, j_0)$ を重み付最小自乗ス

プラインで求める。重み付最小自乗スプラインとは、この内挿の問題において、56 個のデータの時間範囲を、2 階の微係数まで連続な (等間隔の) 6 区間の 3 次曲線で表わし、両端の 2 階の微係数を 0 とする境界条件で、3 次関数の係数を、データとの誤差の、中心付近に重みをおいた重み付の自乗和が最小となるように決めた曲線である。

Hot 及び Cold の平均スペクトル $S_H^{\text{av}}(ch)$ 、 $S_C^{\text{av}}(ch)$ を次の式より求める。

$$S_H^{\text{av}}(ch) = \frac{\sum_{i=-3}^3 \sum_{j=81}^{88} w_i A(i, j, ch)}{8 \sum_{i=-3}^3 w_i} \quad (23)$$

$$S_C^{\text{av}}(ch) = \frac{\sum_{i=-3}^3 \sum_{j=68}^{75} w_i A(i, j, ch)}{8 \sum_{i=-3}^3 w_i} \quad (24)$$

ここで、 w_i は重みで、例えば $\{w_{-3}, w_{-2}, w_{-1}, w_0, w_1, w_2, w_3\} = \{0.1, 0.3, 1.0, 1.0, 0.3, 0.1, 0.0\}$ などである。

これらより、 $i=i_0, j=j_0$ のデータに用いるべき、ゲイン変動補正された Hot と Cold のスペクトル $V_H^{\text{cal}}, V_C^{\text{cal}}$ は、

$$V_H^{\text{cal}} = \frac{S_H^{\text{av}}(ch) A_H^{\text{av}}(i_0, j_0)}{\sum_{ch=0}^{1727} S_H^{\text{av}}(ch) / 1728} \quad (25)$$

$$V_C^{\text{cal}} = \frac{S_C^{\text{av}}(ch) A_C^{\text{av}}(i_0, j_0)}{\sum_{ch=0}^{1727} S_C^{\text{av}}(ch) / 1728} \quad (26)$$

として求められる。

2.8 周波数較正

SMILES では、サブミリ波信号を第 1 IF に変換するローカル発振器 (637.320 GHz) と、第 2 IF に変換するローカル発振器 (9.450, 14.550 GHz) の周波数は十分安定とみなして良く、AOS につい

では、毎スキャンに、コム信号を入れて較正を行う。コム信号は図6のような、100 MHzの高調波で、SMILESのAOSは、1.5-2.8 GHz付近の帯域を持つので、14本のラインを確認することができる。これらのチャンネル位置から周波数較正を行う。

SMILESは、ISSの進行方向に向かって左斜め45°の方位に主鏡の視線ベクトルを持つ。SMILESの視線方向のISSの対地速度の成分は4.6~5.3 km/sである。大気の放射は、4.6~5.3 km/sの速度に応じたドップラシフトを受け、649 GHzの信号では10~11.4 MHz程度の周波数シフトになる。ドップラシフトの大きさは、国際宇宙ステーションの高度、観測緯度などの関数と

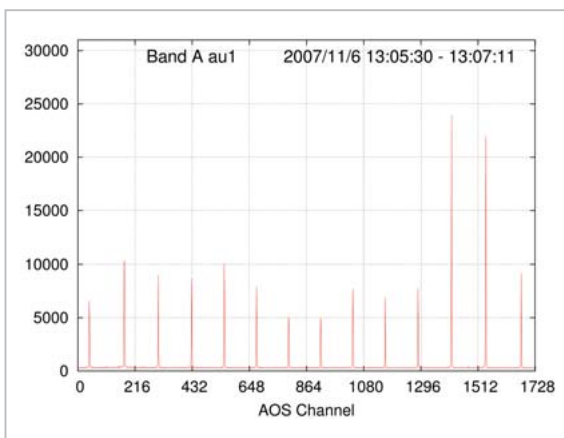


図6 AOSへ入力されるコム信号の例

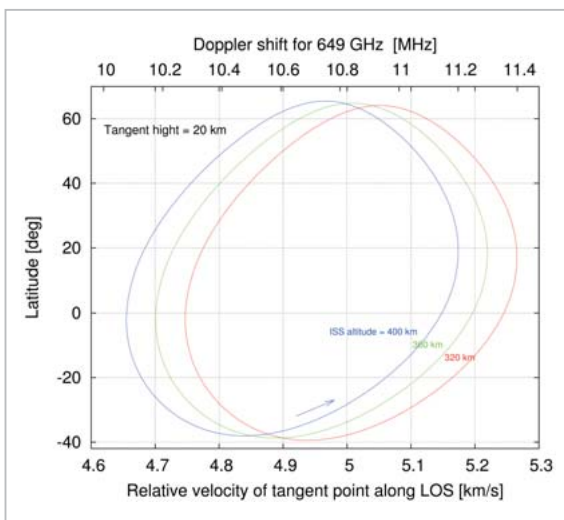


図7 緯度によるドップラシフト量の見積り

風速=0、ISSの姿勢がノミナル、接線高度20 kmの場合の、緯度(縦軸)に対するドップラシフト量の大きさ(上の横軸)。

なる。図7に姿勢がノミナル、接線高度20 kmのとき、tangent pointの対地速度と、風の強さが0の場合のドップラシフト量を示す。ドップラシフトは接線高度が高いほど大きく、高度100 kmあたり0.16 MHzから0.17 MHzの割合で増える。

Level 1の出力では、スペクトルにイメージバンドの信号も含まれており、シグナルバンドの信号とは、IFで見たときにドップラシフトの方向が逆になるので、ドップラシフトによる周波数の補正は、Level 1では行わずに、後段の処理で行うこととして、tangent pointの視線方向の速度を与えることとする。

2.9 幾何学的接線高度

大気が楕円体表面の法線に垂直な薄い層で構成されていると仮定し、リム観測のline-of-sight (LOS)が最も低い層を通る点をtangent point、その高度を接線高度と定義する。この定義においては、地上のある点における法線とLOSが直交し、かつ、その地上の点を通る法線がLOSと交点を持つときに、その交点がtangent pointとなる。地球の形状を回転楕円体として任意の方向にLOSがある場合の接線高度は、解析的に求めるのは困難である。上記の条件を満たす地上の点を、Level 1処理では逐次解法により求める。なお、LOSが子午面内にある場合には、文献[8]にある方法によって接線高度を求めることも可能である。LOSが子午面内ではないときには[8]の方法は正しくない。SMILESではLOSの方位角が-7~100°の範囲で変化するので、[8]の方法は使用することができない。

Level 1で求める接線高度は幾何学的接線高度であり、大気の屈折率によるLOSの曲率を考慮した真の接線高度はLevel 2以降の処理で求めるものとする。

Level 1では、幾何学的接線高度とともに、地球の曲率半径 R_c 、tangent pointとSMILESの距離、視線方位角 θ_{AZ} 等も与える。 R_c は次式で計算する。

$$\frac{1}{R_c} = \frac{\cos^2(\theta_{AZ})}{R_{NS}} + \frac{\sin^2(\theta_{AZ})}{R_{EW}} \quad (27)$$

$$R_{EW} = \frac{R_0}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}} \quad (28)$$

$$R_{NS} = \frac{R_0(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{3}{2}}} \quad (29)$$

ここで、 ϕ は tangent point の緯度、 R_0 は赤道半径 (6378.137 km)、 e は地球楕円体の離心率 ($= \sqrt{2f - f^2}$) である。

2.10 Level 1 データの構成

SMILES の Level 1 データには、Level 1A, Level 1B, Level 1B_REV の 3 種類がある。Level 1A は、Level 0 から必要なデータを切り出したファイルである。Level 1B と Level 1B_REV はフォーマットは同じだが、Level 1B_REV はゲイン変動補正補間処理を施したデータであり、Level 1B は 1 スキャンの中のデータだけで処理を行ったものである。

Level 1B データは 53 秒の 1 スキャンで 1 ファイル作成され、ステータスデータ、時刻データ、観測位置データ、周波数較正データ、輝度温度データ、H&K データ、ISS 補助データから構成される。このうち特に、輝度温度データに、前項までに述べた較正が行われた輝度温度が与えら

れ、観測位置データに、接線高度、観測緯度経度、tangent point と SMILES の距離、地球の曲率半径、視線方向対地速度等の Level 2 以降の処理に必要な情報が与えられる。Level 1B データの詳細なフォーマットについては、データ公開時にその説明が付属する予定である。

3 むすび

本論に述べた SMILES 較正処理のアルゴリズムは、2006 年度に開発された SMILES 低次データ処理部に盛り込まれている。SMILES ハードウェアは、2009 年の打ち上げを予定として試験が進められている。ハードウェアの試験結果が得られるのと並行し、較正処理に与えるパラメータを決定し、較正処理を改善する作業が SMILES ミッションチームで行われている。SMILES ミッションチームでは、それら開発で得られた知見をまとめ、SMILES のデータ処理のアルゴリズムを詳述した文書 algorithm theoretical basis documents (ATBD) を作成する計画である。本論は、ATBD に記載されるべき較正処理の一部分について概要を述べたものである。

SMILES は、宇宙航空研究開発機構と情報通信研究機構が共同して開発したものである。特に有益な議論と協力をしていただいた国立天文台の稲谷順司氏に謝辞を述べたい。

参考文献

- 1 SMILES Science Team and SMILES Mission Team, "JEM/SMILES Mission Plan, Ver.2.1", available at http://www2.nict.go.jp/y/y222/SMILES/Mission_Plan/.
- 2 真鍋, "国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (JEM/SMILES) の開発", 通信総合研究所季報, 48(2), 9-19, 2002.
- 3 落合ほか, "超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) の開発と地上試験", 情報通信研究機構季報, 53(1/2), 123-130, 2007.
- 4 Y. Irimajiri, et al., "BSMILES-a balloon-borne superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder for stratospheric measurements", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10.1109/LGRS.2005.856712, 3(1), 88-92, 2006.
- 5 入交ほか, "気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (BSMILES)", 情報通信研究機構季報, 53(1/2), 137-145, 2007.
- 6 S. Ochiai, et al., "Stratospheric Ozone and ClO Measurement Using Balloon-borne Submillimeter Limb Sounder", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 10.1109/TGRS.2005.845638, 43(6), 1258-1265, 2005.

- 7 R. F. Jarnot, et al., "Radiometric and spectral performance and calibration of the GHz bands of EOS MLS", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 10.1109/TGRS.2005.863714, 44(5), 1131-1143, 2006.
- 8 R. F. Jarnot, et al., "EOS MLS Level 1 data processing algorithm theoretical basis", JPL, Pasadena, CA, Tech. Rep. JPL D-15210, available at <http://mls.jpl.nasa.gov/data/datadocs.php>.
- 9 <http://www.celestrak.com/>
- 10 T. Manabe, et al., "Measurement and Evaluation of Submillimeter-Wave Antenna Quasioptical Feed System by a Phase Retrieval Method in the 640-GHz Band", IEICE Transactions on Communications, *in press*.
- 11 T. Manabe, et al., "A new configuration of polarization-rotating dual-beam interferometer for space use", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 51(6), 1696-1704, 2003.
- 12 西堀ほか, "JEM/SMILES 用常温較正源 (CHL) のサブミリ波電気性能試験結果", 第 8 回受信機ワークショップ「ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ」, P-05, 大阪府大, 2008.

落合 啓

電磁波計測研究センター環境情報セン
シング・ネットワークグループ主任研
究員
マイクロ波リモートセンシング

西堀俊幸

独立行政法人宇宙航空研究開発機構
ISS 科学プロジェクト室 博士 (工学)

尾関博之

東邦大学理学部 博士 (理
学)

菊池健一

産業技術総合研究所エレクトロニクス
研究部門 博士 (理学)

真鍋武嗣

大阪府立大学 工学博士