

JEM 搭載型サブミリ波リム放射サウンダ(JEM/SMILES)の Level2 データ処理システム開発

光田千紘(富士通FIP)、高橋千賀子、鈴木睦、林寛夫、佐野琢己、高柳昌弘(ISAS/JAXA)、
岩田芳隆、谷口弘智(富士通FIP)、今井弘二(とめ研究所)、
SMILES ミッションチーム(ISAS/JAXA、NICT)

1. JEM/SMILES

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES: Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder)は地球大気の微量分子の観測を目的としたセンサである。SMILES は JAXA と NICT の共同ミッションであり、1997 年に国際宇宙ステーションの日本の実験モジュール (JEM: Japanese Experiment Module)の曝露部搭載センサとして採択された。打上げは 2009 年 9 月を予定している。SMILES は 4 K に冷却した超伝導受信機を用いており、これにより Aura/MLS、Odin/SMR といった既存の他のセンサと比べて高感度な観測が期待される。その特徴をいかし、地球大気中の微量成分 O_3 、 ClO 、 HCl 、そしてさらに微量な分子 CH_3CN 、 $HOCl$ 、 HO_2 、 HNO_3 、 BrO およびオゾン同位体などの観測を目指している。

2. Level2 データ処理システム

L2 データ処理では、DPS-L0/L1 から送られる較正済み輝度温度スペクトルデータ(L1B データ)を入力値として、軌道上における各観測地点での微量成分の高度プロファイル(L2 データ)を準リアルタイムで導出する(図 1)。L2 データ処理の基本アルゴリズムには、Optimal Estimation Method (OEM) を用いている。これは他衛星でもよく使われているアルゴリズムであり^[1]、分光観測センサに対しては広く使われているものである。OEM では、forward model (スペクトルを再現する計算)により、Level1 処理出力データに対応するスペクトルデータの計算を行う。Forward model は大気放射伝達計算部と装置関数部に分けられる。JEM/SMILES は高感度な測定器であり、装置関数(アンテナやサイドバンドフィルタなど、図 2)などがスペクトルデータに与える影響を無視できず、これら model に組み込む必要がある。

L2 処理では、この較正済みスペクトルをいかに忠実に、そしていかに高速に再現するかが非常に重要である。我々はそれらを達成するために、フライトモデルの実測値をもとにした応答関数の実装や各計算格子点の選択を行い、Forward model 誤差が観測誤差の 1%以下 (0.01K 以下)、かつ準リアルタイム処理(1 スキャン分の処理を 53 秒以内)を実現した。

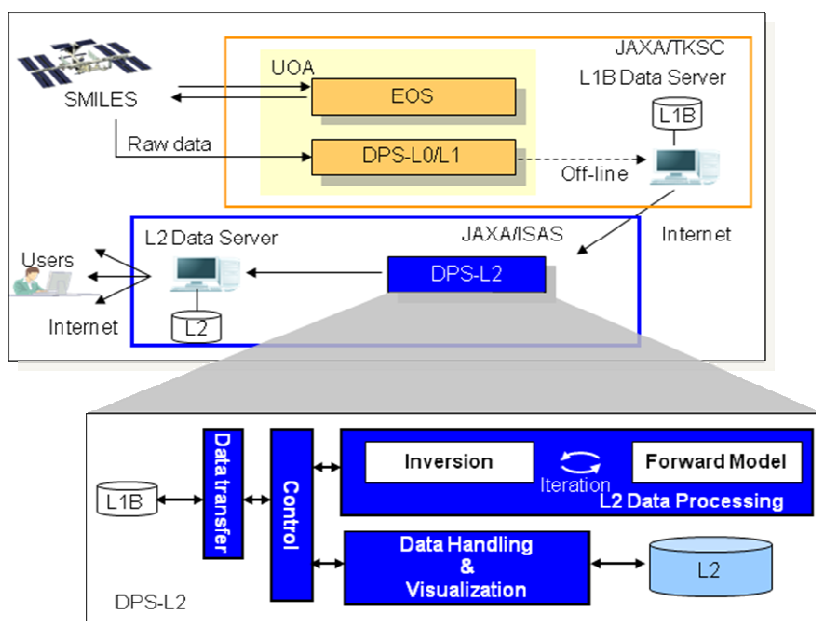


図 1 SMILES 地上局データ処理の流れ^[2]

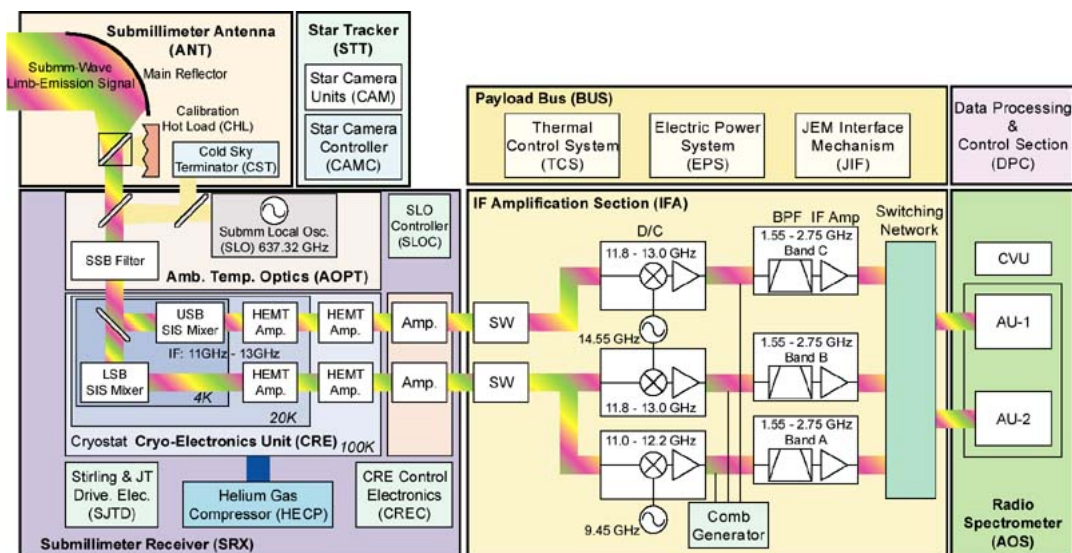


図 2 SMILESのシステムフロー

3.放射伝達コードの高速化

3.1 吸収線の選択

吸収係数の導出計算は吸収線数に比例するため、これを減らすことは計算時間の短縮となる。本アルゴリズムでは吸収線強度が $5.0\text{e-}4$ 以下の弱い吸収線による吸収を無視し、その影響を調べた。吸収線の選択で生じるForward model誤差はリトリバル誤差の 0.002% 程度であり、要求精度を十分に満たしていることを確認した。

3.2 計算周波数の選択

誤差 0.01 K 未満という要求精度を満たすためには、吸収線中心付近では 0.1 MHz の周波数解像度が必要となる。1バンドでの観測周波数幅は 1.2 GHz であるので、周波数刻みを等間隔でとると、 12000 点の計算点が必要になり、計算量が非常に多くなる。一方で吸収線の裾では、吸収係数の変化は緩やかであり、吸収線中心付近ほど計算点を細かく取る必要はない。我々は計算周波数点を自動的に最適化するアルゴリズムを開発し、計算点を 900 点にしてもその輝度温度誤差は周波数選択前と同程度(0.001K 以下)であることを確認した。これによって計算速度は 10 倍向上した。

4. 装置関数のモデル化と高速化

4.1 視野角積分

4.1.1 定式化

SMILESの観測信号はアンテナビームの広がりによる影響を受けているため、Forward Modelにおいても、測定されたアンテナビームパターンを用いて加重平均をとる。観測高度 z_{T0} における輝度温度は、以下の式で表わされる。^[2]

$$T_A(z_{T0}) = \frac{\int_{El_{min}}^{El_{max}} \bar{P}(El) \cdot T_v(z_T(z_{T0}, El)) dEl}{\int_{El_{min}}^{El_{max}} \bar{P}(El) dEl}$$

ただし、 $\bar{P}(El)$ は鉛直方向のアンテナビームパターン、 $T_v(z_T(z_{T0}, El))$ はペンシルビームの輝度温度、 z_{T0} はアンテナの中心の視線方向に対する接線高度、 $z_T(z_{T0}, El)$ は角度 ϕ の方向の接線高度である。 El_{max}, El_{min} はここで考慮すべき視野角の上限と下限を示す。

4.1.2 ISSの傾きによる影響

SMILESのアンテナスキャン軸は、ISSの姿勢の変動によって傾きが生じる。ISSの姿勢変動は、公証値で最大 ± 15 度とされている。SMILESのアンテナビームパターンは水平方向に広い楕円型であるので、 $\bar{P}(El)$ はスキャン軸の傾きの影響を受けやすい。スキャン軸が 15 度傾いた場合に傾きを考慮しないアンテナビームパターンを用いた場合、その誤差はリトリバルエラーと同程度となるため、ISSの傾きの影響は無視できない。L2処理では、をアンテナのスキャン軸の傾き 1 度ごとのアンテナビームパターンをあらかじめ作成し、処理で用いる。これによりISSの傾きによる誤差は観測誤差の 0.1% 以下に抑えられる。

4.1.3 ペンシルビーム輝度温度の計算高度領域・計算点選択

非積分項の $T_v(z_T(z_{T0}, El))$ は、あらかじめ最適化した接線高度 z_T におけるデータを内挿して用いる。アンテナの視野角はおよそ ± 4.0 度であり、観測接線高度 $0 \sim 80\text{ km}$ での $T_A(z_{T0})$ を求めるために必要となる $T_v(z_T(z_{T0}, El))$ の高度範囲は、 $-180 \sim 250\text{ km}$ である。しかしながら、高

度での大気は光学的に薄いため、大気の射出を無視できるだろう。我々はテスト計算により 90 km 以上での大気射出の寄与を無視しても、その差は要求精度以下となることを確認した。これにより、計算領域は約半分となった。

また、アンテナの感度は、アンテナ中心から0.15度離れたところでは 中心の 1% 未満となること
が測定よりわかっている。この角度は高度に直すとおよそ3km となり、したがって、観測高度から数
km以上離れた領域では、 $T_\nu(z_T(z_{T0}, El))$ に対する要求精度は低くなり、計算点を減らすことが
できる。我々は、観測高度外の-180 ~ 0km, 82 ~ 90 km領域での計算点を見直し、270 点必
要であった計算高度点を 1/3 (88点)に減らしても要求精度は満たされることを確認した。

4.1.4 視野角積分計算点選択

FOV積分を均一積分幅にて行くと要求精度を満たすには 501 点の計算点が必要となる。しか
し、アンテナ感度は中心から離れると指数関数的に小さくなるため、積分幅を広くとっても精度を維
持することができる。我々はアンテナ感度によって5種類の積分幅を用い、その精度を見積もった。
その結果、計算点は1/6(81点)となり、かつ要求精度を満たすことを確認した。

4.2 サイドバンドフィルタ

4.2.1 定式化

SMILESはサブミリ波光学系にサイドバンド分離器を搭載している。サイドバンド分離器はイメー
ジバンドからの信号を20dB以下に抑える。これは輝度温度にして約1K以下に抑えられるのである
が、これは我々が要求する精度に比べると無視できない大きさである。したがって、Forward Model
では応答関数の実測値を用い、イメージバンドの信号も含めて計算を行う。

サイドバンド分離器のフィルタ特性は、フライトモデルでの測定結果より、以下のような周波数の
二次関数でよい近似となる。^[3]

$$R^{LSB,USB}(\nu) = m^{LSB,USB}(T)(\nu - \nu_0^{LSB,USB}(T))^2 + \alpha^{LSB,USB}(T)$$

LSB,USB はそれぞれのバンド名であり、 m, a および ν_0 は地上測定により与えられるパラメータで
ある。なお、これらは温度依存性があるため、温度の二次関数として扱う。このフィルタ特性を用い、
フィルタ通過後の輝度温度は以下のように定式化される。^[2]

$$T^{LSB,USB}(\nu) = \begin{bmatrix} 1 - R^{LSB,USB}(\nu) \\ R^{LSB,USB}(\nu) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} T_A(\nu) \\ T_{cst}(\nu) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R^{USB,LSB}(2\nu_{LO} - \nu) \\ 1 - R^{USB,LSB}(2\nu_{LO} - \nu) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} T_A(2\nu_{LO} - \nu) \\ T_{cst}(2\nu_{LO} - \nu) \end{bmatrix}$$

ただし、 ν_{LO} はLOCALの周波数(637.32GHz)であり、 T_{cst} は cold sky terminator からの信号を
示している。

4.2音響光学型電波分光計(Acousto-Optical Spectrometer)

4.2.1 定式化

SMILESは2台のAOSを搭載している。各々のAOS は1728チャンネルあり、約1.2GHzの領域を
カバーする。周波数分解能は約1.8MHz (FWHM) であり、チャンネル間隔は約0.8MHzである。j
番目のチャンネルの信号は、受信機を通った後の輝度温度および チャンネル応答関数を用いて、
以下のように表わされる。^[2]

$$T_{AOS}(\nu_j) = \frac{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} T_A(\nu) H(\nu - \nu_j) d\nu}{\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} H(\nu - \nu_j) d\nu}$$

ここで ν_j はj番目のチャンネルの中心周波数である。

AOSのチャンネル応答関数は、以下のような3つのGaussian Profileの和で近似するがよい^[4]。また、応答関数はチャンネルごとに異なり、その違いは最大で0.8K程度になるため、Forward modelではガウス関数の各係数をチャンネル数の二次関数として扱う。

$$H(\nu - \nu_j) = \sum_{i=1}^3 \frac{A_{i,j}}{w_{i,j} \sqrt{\pi/2}} \exp\left(-\frac{2(\nu - \nu_j - xc_{i,j})^2}{w_{i,j}^2}\right)$$

4.2.2 周波数積分計算点選択

FOV 積分と同様に AOS の感度ごとに 2 種類の積分幅を用い、計算点の調節を行った。その結果、等間隔幅では 80 点必要であった計算点はおおよそ 2/3 (54点) となった。FOV積分に比べるとあまり高速化されていないが、これは輝度温度の周波数構造は高度構造と比較して変化が大きく、あまり解像度を下げることができないためである。

5. 性能評価

FMに対して以上の高速化対応を実装し、実際の処理システム(Quad-Core Intel Xeon 3.14GHz x 2 core, Debian4.0r4(AMD64,EM64T), gcc)による性能評価を行った。4多重度計算を行ったところ、平均計算時間(収束計算含む)は327秒となり、3倍の冗長性を含めても計算機5台というコンパクトなシステムで目標とした準リアルタイム処理が実現可能であることを確認した。

6. まとめ

装置関数のモデル化によってSMILESの高感度観測の特性を活かすことのできる高精度な L2 データ処理アルゴリズムがおおよそ確定した。現在はこのアルゴリズムに沿ってシステムを開発し、プログラムの妥当性を確認している(疑似スペクトルを用いたプログラムテストを終えた段階)。また、このシステムは複数の計算格子点の最適化によって要求精度を維持したまま計算量を削減しており、実運用機を用いた性能評価では、計算機5台で準リアルタイム処理という要求条件を満たしていることを確認した。現在開発はオンスケジュールで進行しており、2009年度はシステムテスト・運用テストによる品質確保を行い、8月には開発を完了する予定である。

7. 参考文献

- [1] Rodgers, C. D. 1976, Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, **14**(4), 609
- [2] NASDA/CRL, JEM/SMILES mission plan, Version 2.1
http://smiles.tksk.jaxa.jp/document/SMILES_MP_ver2.11.pdf
- [3] 落合啓 2008, private communication
- [4] 尾関博之 2008, private communication