

衛星・探査機に搭載するサブミリ波帯ヘテロダイン受信機の開発

菊池 健一[†] 落合 啓[†] 笠井 康子[†] 佐川 英夫[†] 黒田 剛史^{††}

西堀 俊幸^{†††} 真鍋 武嗣^{††††}

[†] 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

^{††} 東北大学 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-1

^{†††} 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

^{††††} 大阪府立大学 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1

E-mail: †{kikuchi.kenichi,ochiai,ykasai,sagawa}@nict.go.jp, ††tkuroda@pat.gp.tohoku.ac.jp,

†††nishibori.toshiyuki@jaxa.jp, ††††manabe@ieee.org

あらまし サブミリ波帯は気体分子の回転遷移のラインに富み、高感度なヘテロダイン観測で得られるスペクトルから、地球や惑星大気に含まれる微量分子の存在量、空間分布、循環といった情報が得られる。本稿では、超伝導検出器を用いた地球観測装置と、惑星探査用に開発が進められている常温検出器を用いた観測装置を紹介しつつ、衛星・探査機に搭載されるサブミリ波受信機に期待される性能や課題について概観する。

キーワード サブミリ波, ヘテロダイン, リモートセンシング, 宇宙

Development of Submillimeter Heterodyne Receivers for Space Use

Kenichi KIKUCHI[†], Satoshi OCHIAI[†], Yasuko KASAI[†], Hideo SAGAWA[†], Takeshi KURODA^{††},

Toshiyuki NISHIBORI^{†††}, and Takeshi MANABE^{††††}

[†] National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1, Nukuikita-machi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

^{††} Tohoku University, 6-6 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{†††} Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505 Japan

^{††††} Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Oksaka, 599-8531 Japan

E-mail: †{kikuchi.kenichi,ochiai,ykasai,sagawa}@nict.go.jp, ††tkuroda@pat.gp.tohoku.ac.jp,

†††nishibori.toshiyuki@jaxa.jp, ††††manabe@ieee.org

Abstract Submillimeter signal from earth and planetary atmosphere provides us wealth of information about amount and spacial distribution of minor species, atmospheric circulation, and so on. This paper introduces some examples of submillimeter receivers for space use, using superconductor or semiconductor mixers for earth and planetary observations, and briefly discusses about development challenges for future missions.

Key words Submillimeter, Heterodyne, Remote Sensing, Space

1. はじめに

SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサを用いた超伝導ヘテロダイン受信機 (超伝導受信機) は、サブミリ波帯において量子限界に迫る究極の高感度分光観測を実現する手段として、主に電波天文や大気観測の分野が主導してその技術を発展させてきた。特に地上からの天文観測の分野では、超伝導受信機はすでに「標準装備」と言って過言ではなく、最近では南米チリのアタカマ高地に建設中の大規模な干渉計計画

であるアルマ望遠鏡 [1] の主要部が完成して観測が開始されるなど、超伝導受信機の技術は高いレベルで成熟した段階に達している。

一方で、超伝導受信機が衛星や探査機などの宇宙機に搭載された実績は、これまでのところ欧州の天文観測ミッション Herschel の HIFI [2] (2009 年 5 月打上げ) と日本の地球観測ミッション JEM/SMILES [4] (2009 年 9 月打上げ) の 2 例があるのみで、宇宙応用という観点からは超伝導受信機は未だ黎明期にあるといえる。ところで本稿の主題から若干逸れるが、

Herschel と同時に打上げられた欧州の宇宙背景放射観測ミッション Planck [3] は、観測装置を冷却してマイクロ波～サブミリ波帯での高感度観測を行うために、4 K 以下の極低温を機械式冷凍機によって実現している (Herschel は液体ヘリウムを使用していた)。2009 年は Herschel・Planck・JEM/SMILES が超伝導技術と極低温冷凍機技術を宇宙に進出させた年として、これらの技術に携わる者としては記憶しておいていいかもしれない。

本稿では、超伝導受信機を用いた地球観測装置と、惑星探査用に開発が進められている常温受信機 (半導体受信機) を用いた観測装置を紹介しつつ、衛星・探査機に搭載されるサブミリ波受信機に期待される性能や課題について概観する。

2. ヘテロダイン受信機による大気観測

大気から放射されるサブミリ波帯の信号には、比較的単純な気体分子の回転遷移による線スペクトルが豊富に含まれている。例として、火星周回機から直下を見た時に得られると予想されるスペクトルのシミュレーション結果を図 1 に示す。線スペクトルの面積強度は分子の存在量に関する情報を、また線幅や中心周波数は温度・圧力・運動速度といった情報を含んでいることから、スペクトルのプロファイルを得ることによって、観測視野内に含まれる気体分子の物理量を知ることができる。

図 2 はヘテロダイン受信機的主要な構成要素を示したものである。観測対象から放射された周波数 F_{RF} のサブミリ波信号はまずアンテナで受信され、ミキサ (Mixer) へと導かれる。ミキサでは、このサブミリ波信号と受信機が内部に持つ局部発振器 (Local Oscillator) からの F_{LO} の信号をミキシングし、それらの差周波数に対応する数 GHz 程度のマイクロ波帯の中間周波数 (IF) F_{IF} の信号に変換する。変換された信号は後段のアンプで適当に増幅されるなどして、最終的には分光計 (Spectrometer) において分光検出される。局部発振器の周波数精度は $\Delta\nu/\nu = 10^{-7}$ 程度、分光計の帯域幅は数 GHz 程度というのが典型的な値である。

観測対象の輝度温度 (信号強度の等しい黒体放射源の温度に

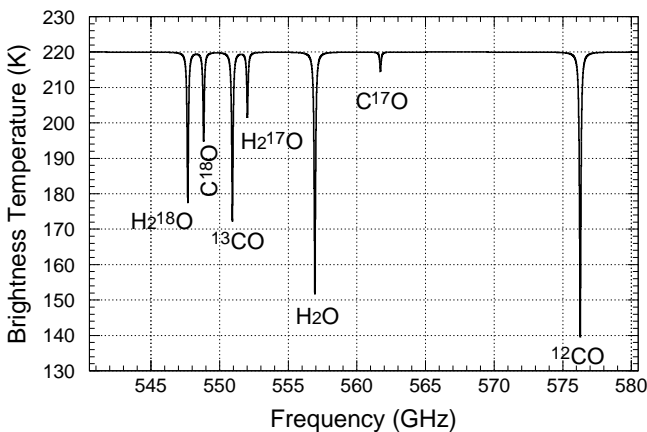


図 1 火星の直下観測で得られるスペクトルのシミュレーション。
Fig. 1 Simulated Martian spectrum assuming nadir looking.

換算したもの) が T_{sig} である場合、分光計で検出される電力 P_{det} は以下のように表される。

$$P_{det} = (T_{sig} + T_{SYS}) G_{SYS} k B \quad (1)$$

ここに T_{SYS} は受信機システムの入力換算雑音温度 (システム雑音温度)、 G_{SYS} は利得、 k と B はそれぞれボルツマン定数と観測帯域幅を表す。 T_{SYS} には不確定性原理から要請される量子限界 ($T_{SYS} > h\nu/k$, h と ν はそれぞれプランク定数と周波数) の壁がある。 T_{SYS} がどれほどこの限界に近いかがその受信機の検出感度の指標となり、ショットキー・バリア・ダイオード (SBD) など半導体のミキサを用いた受信機では量子限界の数十～百倍程度、超伝導ミキサだと半導体ミキサの十分の一程度というのが典型的である [5]。

入力換算雑音温度が T_{SYS} の受信機のノイズ (検出されるスペクトルのゆらぎ) は一般に、ラジオメータ方程式 [6]

$$T_{\sigma} = \frac{T_{SYS}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2)$$

で表すことができる。 τ は積分時間である。すなわち、同じ大きさのノイズ T_{σ} を実現するためには、もしも T_{SYS} を 1/2 にできれば、観測帯域幅あるいは積分時間は 1/4 で済むことになる。このように、受信機の T_{SYS} を下げることは周波数分解能を上げたり、短時間で変動する現象を観測する上でも重要である。

地球や惑星を周回する衛星から大気観測を行うことのメリットのひとつは、着目する分子種の全球的な分布を調べられることにある。全球に渡るグローバルなマップを描きつつ、現実的なサイズのアンテナで高い空間分解能を実現したいと考える場合、衛星の軌道高度はなるべく低い (観測対象に近い) ことが望ましい。たとえばアンテナの直径を 1 m、観測周波数を 600 GHz (波長 0.5 mm) とすると回折限界は約 2 分角となる。地球表面から高度 400 km にある衛星から地球のリムを観測する場合、衛星から地平線までの距離は $\sqrt{(R_E + 400)^2 - R_E^2} \approx 2300$ [km] (R_E は地球の半径で約 6400 km) であることから、回折限界による空間分解能は約 1.4 km ということになる。しかし一方で、軌道が低いと対地速度が大きくなり、高度 400 km の軌道を周回する衛星では秒速 8 km ほどに達するので、観測の

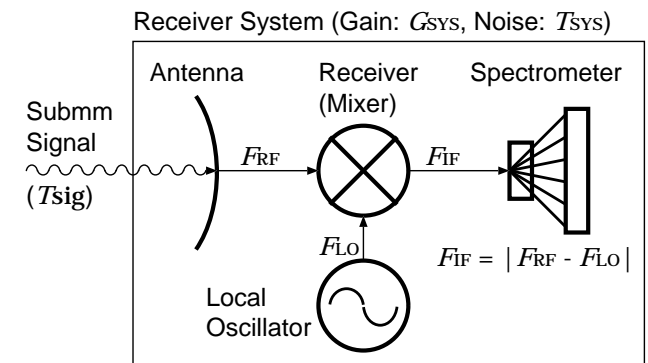


図 2 ヘテロダイン受信機の概観図。
Fig. 2 Schematic view of heterodyne receiver.

積分時間もなるべく短くしなければならない。式 (2) より、短時間の観測でもノイズを低く抑えられる超伝導受信機の特長は、衛星搭載の観測装置としても適しているといえる。

3. 宇宙機搭載のサブミリ波帯受信機の例

3.1 地球観測用の超伝導受信機 (JEM/SMILES)

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (JEM/SMILES) は 640 GHz 帯の超伝導ミキサを搭載しており [7]、主として地球の成層圏オゾンおよびオゾン破壊関連物質の精密測定を通して大気化学のサイエンスを推進するという目的を持つ一方で、超伝導デバイスや機械式 4 K 級冷凍機の宇宙実証といったエンジニアリング的な役割を果たした。

JEM/SMILES は 2009 年 9 月に打上げられて国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟 (JEM) 船外実験プラットフォームに取り付けられた後、2009 年 10 月から観測を開始した。残念ながら 2010 年 4 月に生じた機器の不具合によって観測を中止することとなったが、その約半年間、JEM/SMILES のシステム雑音は 380 K 以下を保ち、超伝導受信機ならではの低雑音性能を遺憾なく発揮した。軌道上での性能については文献 [8] に詳しいので参照されたい。

JEM/SMILES は高度約 400 km から地球のリム方向にアンテナを向け、これを鉛直方向の一軸に駆動することによって大気分子の高度分布を得る [9]。冷凍機は、20 K と 100 K の温度を作り出す 2 段式スターリング冷凍機と、それを予冷機として 4 K を作るジュール・トムソン冷凍機から構成され [10]、それぞれ冷却 HEMT アンプと SIS ミキサの冷却を行う。

JEM/SMILES に搭載された SIS デバイスは、国立天文台野辺山宇宙電波観測所のクリーンルームで製作された。デバイスの中心である SIS 接合部の断面は Nb/Al-AIO_x/Nb の三層構造をしており、電流密度は約 6 kA/cm²、また接合部の面積はおよそ 1 × 1 μm² である。宇宙品としての信頼性を高めるため、SIS デバイスでは 2 個の SIS 接合を並列に配置した parallel-connected twin junctions [11] と呼ばれる回路を採用することによってサブミリ波信号とのインピーダンス整合をとっており、バックショートを経験的に調整するような機構を排除している。

JEM/SMILES が観測したデータの解析は現在も精力的に進められており、これまでに成層圏オゾンやオゾン破壊に寄与する BrO など超微量分子の分布の日変化の様子をとらえるなど、大気化学の発展に資する成果を上げてきている ([12], [13] など)。

3.2 惑星探査機搭載の半導体受信機

惑星など太陽系内の天体を観測する手段として、サブミリ波帯のヘテロダイン受信機を搭載する深宇宙探査ミッションが計画されはじめてきている。欧州の Rosetta/MIRO [14] は彗星探査を目的として 188 GHz 帯と 562 GHz 帯の受信機を搭載し、2004 年に打上げられた。欧州ではさらに、2022 年頃の打上げを目指す JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) という大型の木星探査計画を進めており、600 GHz 帯と 1200 GHz 帯、もしくは 2 系統の 600 GHz 帯のヘテロダイン受信機を持

つ SWI (Submillimetre Wave Instrument) が搭載される予定である [15]。

筆者らのチームは JUICE/SWI の開発に参加するとともに、将来に日本主導で進める火星探査を想定したサブミリ波受信機 FIRE (Far-Infrared Experiment) の検討を行ってきている [16]。火星地表面での気圧は約 6 hPa 程度と地球の成層圏での値に近く、圧力による線スペクトルの広がりには 10 MHz 程度のオーダであり (図 1)、地球観測でも使われているヘテロダイン受信機の帯域幅や周波数分解能と相性がいい。また、火星の気象はダストストームと呼ばれるような砂嵐現象が大きな役割を担っていると考えられているが、サブミリ波帯の波長であればダストが発生している領域の内部を見通して温度場を観測できるなど、可視や赤外の観測では得られない情報を提供できるものと期待している。

一般に、宇宙機に搭載する観測装置には質量や電力といったリソースに対して厳しい制限が課せられるが、地球周回衛星と比べても惑星探査機のリソース制限はさらに厳しく、JUICE/SWI や FIRE の質量は 10–20 kg 程度、消費電力は 40–50 W 程度に抑える必要がある。これらの受信機では半導体のミキサを採用する予定であるが、その理由の大きなひとつは、このように極低温冷凍機を搭載するリソースの余裕が無いことによるものであると言える。

4. おわりに — 将来の宇宙機へ向けて

前項で紹介した JEM/SMILES および FIRE, SWI の主要な諸元を表 1 にまとめた。観測対象や手法、機器構成が同じではないので単純に比較はできないが、これを元にして、超伝導技術を広く宇宙機に応用する上での課題などをざっと考えてみたい。衛星や探査機の開発は人生の時間スケールを要する気の長いプロジェクトであり (たとえば JUICE の打ち上げは 2022 年、木星圏到着は 2030 年の予定である)、その頃の遠い将来の

表 1 JEM/SMILES, FIRE, SWI の主要諸元

Table 1 Major characteristics of JEM/SMILES, FIRE, and SWI

	JEM/SMILES (地球周回)	FIRE, SWI (惑星探査)
ミキサのタイプ:	超伝導体 (SIS)	半導体 (SBD)
システム雑音温度 ^a :	297–380 K	~ 2000 K
観測周波数帯:	640 GHz 帯	~ 600, 1200 GHz 帯
観測周波数幅:	1.25 GHz	4–5 GHz
周波数分解能:	~ 1 MHz	0.1 – 20 MHz
主鏡サイズ:	20 cm × 40 cm	φ30–40 cm
主鏡駆動:	一軸 (鉛直方向)	二軸
消費電力:	< 334 W (運用初期)	40–50 W
質量:		
アンテナ系:	21 kg	~ 3–6 kg
受信機系:	~ 100 kg ^b	~ 3–6 kg
分光計:	13 kg	~ 2 kg

a: 600 GHz 帯での値。

b: 冷却系 (クライオスタット 23.9 kg, 冷凍機 33.2 kg, 駆動回路 24.5 kg) を含む。

技術を夢想しつつ，少々雑多な話となることを御容赦いただきたい．

まず，当然ながらシステム雑音温度は，半導体受信機では超伝導受信機よりも数倍程度大きくなると予想される．式 (2) にしたがって， τ を大きくすれば雑音の影響は低減されるが，積分時間を大きくとるということは短時間で変動する成分が見えなくなることで空間分解能が悪くなることを意味し，自ずと限界があるものと思われる．火星の高度 20 km 以下の風速を測定する場合などはこの受信機雑音が問題となり，超伝導受信機のような低雑音の観測装置が必要になるという検討もなされている [16]．

惑星探査機の検討において，超伝導受信機の搭載が期待されつつも困難であるとされるのは，やはり探査機が提供できる質量と電力のリソースに対して極低温冷却機が必要とするものが大きすぎるのが最大の理由であると考えられる．極低温冷凍機には宇宙で数年以上におよぶ連続運転を行った実績が無いなど信頼性に関わる課題もあるが，まずは質量と電力の問題がクリアされる見通しがない限りは，おそらく惑星探査機に超伝導受信機を搭載しようという議論が始まらない．

地球よりも太陽から遠い外惑星の探査機については，太陽からの放射の影響が低減されるということは利点と考えられるかもしれない．JUICE は木星圏に達すると，構体外部に置かれる装置の温度は 120–150 K 程度にまで下がると予想している．このような環境で受動的な放射冷却を最大限に活用しつつ，軽量で消費電力の低い能動的な冷凍機を組み合わせる極低温環境をつくり出せないものかと期待する．

リソース削減という観点から，超伝導技術の側からは何かやれることが無いかということ，もちろんある．デバイスをアレイ化して二次元あるいは一次元でもイメージング観測を行えるようになれば，アンテナの駆動機構を簡素化できる．また，超伝導共振器を用いた KIDs (Kinetic Inductance Detectors) とフィルタバンクをチップに載せたイメージング・スペクトロメータ [17] といった技術が進めば，分光計を別途用意する必要がなくなり，さらにチップだけを極低温にすればいいということであれば，冷凍機的大幅な小型化についても検討しやすくなるのではないかと．

文 献

- [1] A. Wootten, A.R. Thompson, “The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array,” *Proc. IEEE* 97, 1463, 2009.
- [2] Th. de Graauw, et al., “The Herschel-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI),” *Astronomy and Astrophysics* 518, L6, 2010.
- [3] P.A.R. Ade, et al., “Planck early results. I. The Planck mission,” *Astronomy and Astrophysics* 518, A1, 2011.
- [4] SMILES Science Team, SMILES Mission Team, “JEM/SMILES Mission Plan (version 2.1),” <http://smiles.tksc.jaxa.jp>, 2002.
- [5] テラヘルツテクノロジー動向調査委員会，テラヘルツ技術，オーム社，東京，2006.
- [6] R.H. Dicke, “The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies,” *Review of Scientific Instruments* 17, 268, 1946.
- [7] K. Kikuchi, Y. Fujii, “Flight Model Performance of 640-GHz Superconductor-Insulator-Superconductor Mixers for

- JEM/SMILES Mission,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 31, 1205, 2010.
- [8] S. Ochiai, K. Kikuchi, T. Nishibori, T. Manabe, H. Ozeki, S. Mizobuchi, Y. Irimajiri, “Receiver Performance of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) on the International Space Station,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 51, 3791, 2013.
- [9] 真鍋，西堀，菊池，落合，瀬田，大嶺，“JEM/SMILES 用サブミリ波アンテナ・受信機光学系，” *電子情報通信学会論文誌 B* J95-B, 990, 2013.
- [10] K. Otsuka, S. Tsunematsu, A. Okabayashi, K. Narasaki, R. Satoh, “Test results after refurbish of cryogenic system for SMILES,” *Cryogenics* 50, 512, 2010.
- [11] T. Noguchi, S.-C. Shi, J. Inatani, “An SIS Mixer Using Two Junctions Connected in Parallel,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 5, 2228, 1995.
- [12] Y. Kasai, H. Sagawa, “Measuring atmospheric chemistry and ozone levels,” *SPIE Newsroom*, <http://dx.doi.org/10.1117/2.1201307.004981>, July 2013.
- [13] T. Sakazaki, M. Fujiwara, C.+Mitsuda, K.+Imai, N.+Manago, Y.+Naito, T. Nakamura, H. Akiyoshi, D. Kinnison, T. Sano, M. Suzuki, M. Shiotani, “Diurnal ozone variations in the stratosphere revealed in observations from the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) on board the International Space Station (ISS),” *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 2991, 2013.
- [14] S. Gulkis, M. Frerking, J. Crovisier, G. Beaudin, P. Hartogh, P. Encrenaz, T. Koch, C. Kahn, Y. Salinas, R. Nowicki, R. Irigoyen, M. Janssen, P. Stek, M. Hofstadter, M. Allen, C. Backus, L. Kamp, C. Jarchow, E. Steinmetz, A. Deschamps, J. Krieg, M. Gheudin, D. Bockelée-Morvan, N. Biver, T. Encrenaz, D. Despois, W. Ip, E. Lellouch, I. Mann, D. Muhleman, H. Rauer, P. Schloerb, T. Spilker, “MIRO: Microwave Instrument for Rosetta Orbiter,” *Space Science Reviews*, 128, 561, 2007.
- [15] P. Hartogh, S. Barabash, G. Beaudin, P. Börner, D. Bockelée-Morvan, W. Boogaerts, T. Cavalié, U.R. Christensen, A. Dannenberg, P. Eriksson, M. Fränz, T. Fouchet, U. Frisk, K. Hocke, C. Janssen, C. Jarchow, Y. Kasai, K. Kikuchi, J.-M. Krieg, N. Krupp, T. Kuroda, E. Lellouch, A. Loose, A. Maestrini, T. Manabe, A.S. Medvedev, J. Mendrok, E.P. Miettinen, R. Moreno, A. Murk, D. Murtagh, T. Nishibori, M. Rengel, L. Rezac, H. Sagawa, E. Steinmetz, B. Thomas, J. Urban, J. Wicht, “The Submillimetre Wave Instrument on JUICE,” *European Planetary Science Congress, London, United Kingdom, Sept. 2013*.
- [16] Y. Kasai, H. Sagawa, T. Kuroda, T. Manabe, S. Ochiai, K. Kikuchi, T. Nishibori, P. Baron, J. Mendrok, P. Hartogh, D. Murtagh, J. Urban, F. von Scheele, U. Frisk, “Overview of the Martian atmospheric submillimetre sounder FIRE,” *Planetary and Space Science* 63-64, 62, 2012.
- [17] A. Endo, C. Sfiligoj, S.J.C. Yates, J.J.A. Baselmans, D.J. Thoen, S.M.H. Javadzadeh, P.P. van der Werf, A.M. Baryshev, T.M. Klapwijk, On-chip filter bank spectroscopy at 600 – 700 GHz using NbTiN superconducting resonators, *Appl. Phys. Lett.* 103, 032601 2013.