



月低周波電波望遠鏡:LLFASTによる月からの木星電波観測

Jovian Radio Wave Observation using LLFAST: Lunar Low Frequency Astronomy Telescope

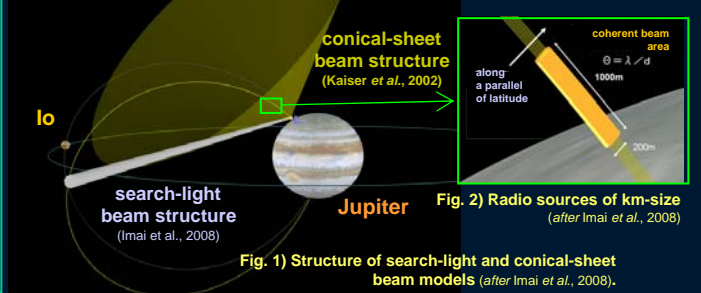
岩田隆浩¹, 今井一雅², 中城智之³, 近藤哲朗⁴, 竹内 央¹
Takahiro Iwata^{1*}, Kazumasa Imai², Tomoyuki Nakajo⁵, Tetsuro Kondo⁴, & Hiroshi Takeuchi¹

¹ISAS/JAXA (宇宙研), ²Kochi N. C. Tech. (高知高専), ³Fukui Univ. Tech. (福井工大), ⁴NICT (情報通信機構)
* iwata.takahiro@jaxa.jp

要旨:木星からの強力なデカメートル波(DAM)の電波放射機構は未知の部分が多く、電波放射機構を解明することによって、宇宙空間プラズマ物理学の重要な本質に迫ることが可能になると考えられている。この木星電波放射機構を解明するためには、木星電波放射源の空間的な情報を得ることが最も重要なポイントとなる。木星電波の公転周期に伴って変動するDe (Jovicentric Declination of the Earth) 効果から、木星と衛星イオの成す電波放射源として、サーチライト状のビーム構造が推測されている [1]。また、モジュレーション・レーン法観測結果とジャイロ周波数との考察から、木星の電波源は20km (観測周波数26MHzにおいて)を上限とすることが示唆されている。しかしながら地上でのVLBI観測では、木星位置での最高分解能は1000kmであることから、電波源サイズを測定することは不可能である。このため、宇宙空間を利用した、より大型の観測システムによる高分解能観測が期待されてきた。

月低周波電波望遠鏡:LLFAST(Lunar Low Frequency Astronomy Telescope)は、「かぐや」に続く次期探査機(仮称:SELENE-2)の月面回オビターへの搭載を予定されている電波望遠鏡であり、これは将来の10MHz帯以下の月面低周波干渉計に向けての第一歩である。月周回軌道上のLLFASTと地上の電波観測局から構成されるシステムにより、20-25MHz帯での木星電波のスペースVLBI観測を行うことにより、木星電波源に近づく20kmの高い空間分解能での観測を実現する。

LLFASTは、オビター機体から伸張するクロスダイポールアンテナと、衛星内部に搭載される受信・記録・軌道上デジタル処理システムから構成される。観測時には、アンテナは3軸制御により木星を指向する。20-25MHz帯(帯幅観測では15-25MHz)で受信された短波帯信号を、アナログ・デジタル変換後に記録し、要求に応じて必要な時刻・周波数のデータを地上にダウンロードする。これらの観測信号と地上局で観測されたデータとの相関処理を行う。



木星電波放射機構の知見と課題:太陽系惑星で最強の電波源である木星デカメートル波(DAM)は、1955年一発見されていながら、その放射機構は未解明である。これは、放射機構の解明には地上観測では分解能が不足し、これを補うために探査機によるin-situ観測で高分解能観測を試みたものの、極めて局所的な観測で全貌が見えないことが電波源の形状・分布の解明に制約となることが原因であり、両者をつなぐ観測手法の必要性が明らかとなっている。

放射機構の解明に取り組むためには、電波源の構造や、これと密接に関連している電波ビームの形状を明らかにすることが不可欠である。これまでの地上からの経年観測と探査機のin-situ観測(例: Carr et al. 1983, および modulation lane法による位置推定 [Imai et al. 2002])からは、主要な放射形状モデルである conical-sheet beam (emitting cone)モデル (Fig. 1, 例: Dulk 1967) と search-light beamモデル (Fig. 1, 例: Imai et al. 2008) が提唱されているが、これらの放射モデルを定量的に検証する観測データが不足している。特に、磁気方向に数km、緯度方向に数百mの幅を持つと推定される電波源(コヒーレント領域) (Fig. 2)のサイズは上限を押し越えている。放射機構を解明する上で極めて重要である。しかし、地上VLBI観測では分解能が不足すること、in-situ観測では電波放射の全体像が判らない(地球AKRでも同様の制約に見舞われてきた)ことから、電波源サイズの決定は決定的に困難である。これを解決するには、ちようど月-地球基線に相当するスペースVLBIの空間分解能と視野が重要であり、今まで見ることができなかった電波源のミクロな構造を初めて見ることが可能となる。また月-地球基線の空間分解能を用いることにより、個々の電波源の構造に加えて、木星とイオをつなぐ磁力線間の電波源の様子を詳細に知ることができる。これによって、磁力線に沿ったエネルギー注入の分布を緯度方向に調べて (Fig. 3)、木星イオ間のエネルギー輸送状態の解明が可能となる。

一方、放射の素過程のモデルとして、双極子磁場に沿って極域に降り込む電子ビームを起源とするCMI (cyclotron maser instability)モデル (Wu & Lee, 1979) と、静電的プラズマ波動から電磁波へのモード変換を予測する Mode Conversionモデル (Oya 1971) が提示されている。これら2つのモデルは、木星電波源の偏波特性において異なる関係を示唆し、前者では北半球から右回り、南半球から左回りの偏波が観測され (Fig. 4)、一方後者では南半球からの右回り偏波が卓越する。しかしながら、地上観測では電離層の影響により偏波特性が抽出困難なこと、in-situ観測では木星全体での分布が判らないことに加えアンテナ構成・衛星姿勢等の観測制約により、この偏波特性の詳細も未確定であった。この偏波分布と特性を同時に観測して素過程を決定するため、月-地球基線スペースVLBIの空間分解能・視野が必要である。特に、電波源の位置について南北半球のいずれかを決定するためには十分な遅延時間測定精度が必要であり、このためには地球電離層の影響の小さい低緯度の電波源場が必要不可欠である。

LLFASTの設計要求・仕様: (Fig. 6, Table 1にまとめ)
[スペースVLBI観測システム] (Table 2にJUNOとの比較, Fig. 7に地上局)
- 観測周波数: 20-25 MHz
- 空間分解能: 木星において 20 km (最大基線長: 約400,000 km相当)
- 相関係数: 0.95-0.98 (目標値); 同定可能サイズ: 木星において3-1 km
[SELENE-2オビター搭載機器]
- 受信可能周波数: 15-25 MHz (20-25 MHzをVLBI観測で使用)
- 2ch (直交偏波) 伸張式クロスダイポールアンテナ、素子長 3.35 m
- プリアンプ: 受信信号増幅率 40-60 dB
- 電界線音放射限界: 7 dBuV/m (調整中)
- 周波数標準: 安定度 10-10 (積分時間: 60 s) - 10-11 (600 s), p-cal信号生成
- 時間分解能: 10⁻⁴ s - 10⁻⁶ s (調整中)
- サンプリングパラメータ: 60 MHz, 8 bit, 2 ch (2偏波)
- データレート: 生成 960 Mbps、記録 160 Mbps (10 MHz再サンプリング後)、再生 180 kbps (デジタルフィルタリング後)
- データ記録容量: > 220 GB/week
- デジタルフィルタリング: 時刻・周波数・bit選択のコマンド指示、option: 自律選定

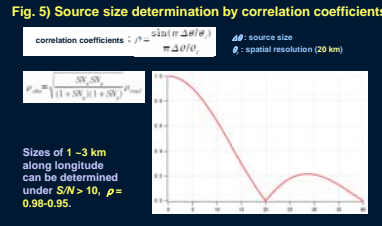
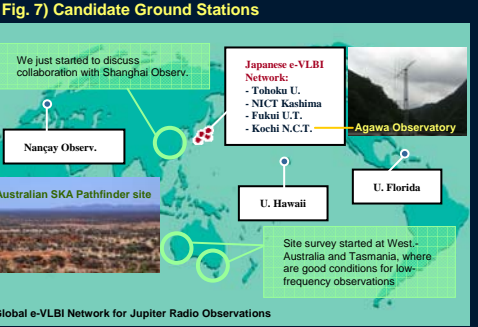
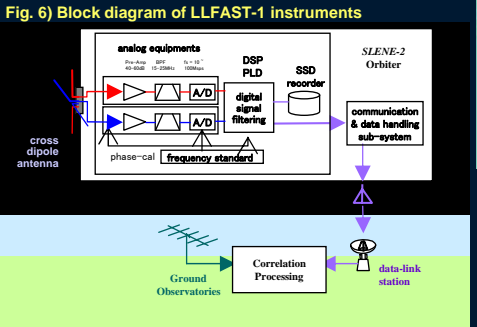


Table 2) Comparison between LLFAST and JUNO

item	LLFAST	JUNO
measurements of source size	superior	difficult
time resolution	superior	inferior
polarization	superior	inferior
frequency range	inferior	superior
particle and magnet field	impossible	superior
direct observation of sources	impossible	superior

Table 1) Properties of LLFAST onboard instruments

configuration	Moon (1 element)/Earth interferometer
site	lunar orbit (SELENE-2 Orbiter)
frequency	20 - 25 MHz ; interferometry (15 - 25 MHz ; single dish)
component; tentative mass	- 3.35m cross dipole antenna; 9.0 kg (antenna + mechanism) - receiver system; 10.5 kg (amplifier, sampler, recorder) - frequency standard of <10 ⁻¹¹
power	9.6-18.3 W (during observation)
data handling	sampling; 60 MHz, 8 bit, 2 ch (to detect polarization) down-link; 200 kbps



References:
Carr et al. (1983), In *Physics of the Jovian Magnetosphere*, 226.
Dulk (1967), "Apparent Changes in the Rotation Rate of Jupiter", *Icarus*, 7, 173.
Imai et al. (2002), *JGR*, 107, A6, 10.1029/2001JA005555.
Imai et al. (2008), AGU Fall Meeting, SM41B-1673.
Nakajo et al. (2001), *IVS CRL-TDC News*, 19, 19.
Oya (1971), *Radio Sci.*, 6, 1131.
Wu & Lee (1979), *ApJ*, 230, 621.