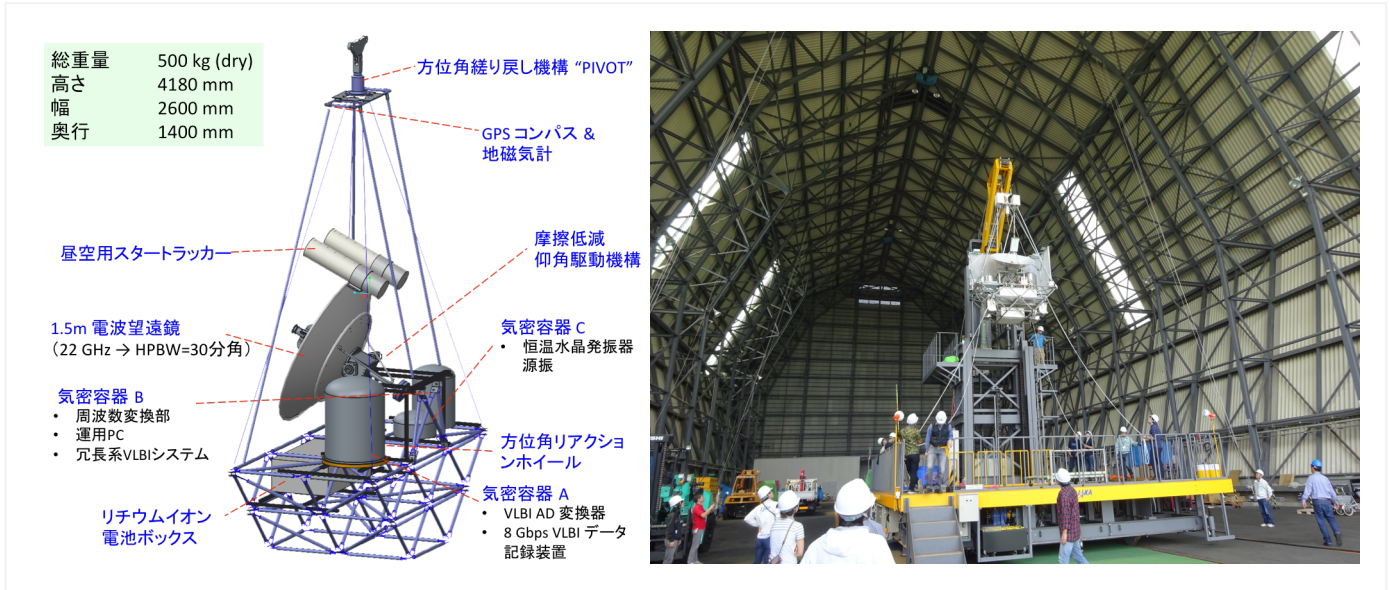


気球 VLBI 実験：2016 年実験の報告と実験再提案

ISAS/JAXA, 国立天文台^A, 大阪府大院理^B, 総研大^C, 東大生産研^D, 岐阜高専^E, 東大院^F, 防衛大^G,
 大阪府大院工^H, 首都大^I, 名城大理^J, 山口大^K, 山口大院理工^L
 。土居 明広, 河野 裕介^A, 木村 公洋^B, 馬場 満久, 松本 尚子^A, 中原 聡美^C, 岡田 望^B
 村田 泰宏, 鈴木 駿策^A, 斉藤 一哉^D, 渡邊 尚彦^E, 舘 知宏^F, 石村 康生, 田中 宏明^G
 小木曾 望^H, 鳥阪 綾子^I, 仙場 淳彦^J, 本間 希樹^A, 小山 友明^A, 小川 英夫^B, 本間 愛彩^B
 高橋 涼^B, 長谷川 豊^B, 井上 将徳^B, 藤澤 健太^K, 中村 拓^L



概要

サブミリ波やテラヘルツ帯などの高周波電波における天文観測は、対流圏の水蒸気等の影響を強く受け、電波干渉計の空間分解能や感度が制限される。電波干渉計が成層圏で形成された例はこれまでにない。その技術的フィージビリティの検証のため、我々はフライト実験機を開発した。2016年夏、放球をおこなうべく JAXA 大樹航空宇宙実験場へ実験機を輸送し準備作業をおこなった。実験場にて、地上での機能・性能確認をおこない、吊り状態での姿勢制御による目標電波源の指向・追尾、また、干渉縞（フリッジ）を得ることができ、end-to-endでのシステム動作は確認できた。しかし、いくつかの系（この実験機は、複数のコンポーネントで主系/冗長系を組んでいる）の機能を現地で確立することができず、課題を残すとともに、気象条件が整わず、放球はおこなわれなかった。本講演では、実験場での準備作業について報告するとともに、次年度の放球を再提案する。

1. ミッションの概要

電波干渉計を成層圏に展開することが可能かどうか技術的なフィージビリティを調査する目的で、気球搭載型電波望遠鏡 Gondra システムのフライト実験機を開発した。干渉計としては、Very Long Baseline Interferometry (VLBI) の原理を用いる。VLBI の一素子として必要な機能はすべて Gondra に搭載し(電波望遠鏡・受信機・周波数変換部・周波数標準源振・高速データ記録装置・局位置決定システム)、飛翔体望遠鏡バスとしての機能(姿勢決定系・指向制御系・電源系)を合わせ、総重量 500 kg (dry) のなかで

実現する。1997年にM-Vロケットによって打ち上げられた電波天文技術実証衛星 HALCA にも、同じ VLBI の原理が用いられていたが、VLBI の心臓部というべき「周波数標準源振」「VLBI データ記録装置」は搭載せず、地上設備とし、運用制限のなかで科学成果を生み出した。これは当時の技術水準では順当な選択であったと考えられる。今回の気球 VLBI Gondra システムでは、将来のスペース電波干渉計システムに期待される「周波数標準源振」「高速データ記録装置」の飛翔体側への搭載、に挑戦するシステム構成としている。

今回の実証実験では、JAXA 大樹宇宙実験場から

単機を放球し、地上の電波望遠鏡との間で干渉計を形成する。日本の地上望遠鏡群も実験に参加できる範囲の高周波帯 K-band (～20 GHz 帯, 波長～1.5 cm) で観測する。目標電波源の1つは南西の空にある静止衛星 (IPSTAR or THAICOM4) であり、強度の大きな人工電波を利用する。高い信号雑音比で実験をおこなうことで、観測システムの安定性を計測し、より高い周波数帯での将来ミッションの実現性を見極めたい。

2. 研究の背景

将来ミッションの可能性として、波長 1mm (300 GHz 帯)以下「サブミリ波帯」で観測する VLBI が考えられる。現在、このような高周波帯の VLBI は地上で実験中の段階にあり、国際的に挑戦が始まりつつある。この周波数帯の宇宙電波でも、地球大気はいくらか通過してくるが、主に対流圏中の水蒸気の揺らぎにより波面が乱されるため、長い基線の干渉計形成は難しい。標高 5000 メートルの高地に建設された ALMA は、基線長 10 km オーダー(→ 10 ミリ秒角オーダーの空間分解能)となっている。大陸間基線の高周波 VLBI の実現は、主に 230 GHz 帯(波長 1.3 mm)以下で推進されている (e.g., Event Horizon Telescope Project: EHT)。地球大気の問題は、飛翔体・衛星観測局の実現により、抜本的に解決できる可能性がある。

将来のサイエンステーマとして、サブミリ波帯での長基線 VLBI が実現するマイクロ秒角の空間分解能を用いた「ブラックホールの直接撮像」や「ブレーザーの高エネルギー放射領域の直接撮像」や、未だ全く未知の領域であるテラヘルツ帯での天体現象の撮像による研究分野の開拓が期待できる。ブラックホールもブレーザーも、その中心の高密度領域を見通すには、サブミリ波帯 (300 GHz 以上)の観測が望ましいと予想されている。すなわち高周波電波は、天体側にとって電磁波の通過窓である。反対に、電波干渉計にとっては、地球の対流圏は良好な通過窓ではない。成層圏は、実質的にスペースと同等の観測サイトである。

3. 技術課題

我々は、サブミリ波 VLBI の将来ミッションを想定して CTE 識別をおこない、ミッションクリティカルとなる技術要素について TRL 分析をおこなった。

その結果、フィージビリティを確認すべき技術的課題が以下のように抽出された:

- (1) 高周波帯電波望遠鏡の機械精度と搭載性、
- (2) 周波数標準源振の搭載環境での安定性
- (3) 高速データ記録装置の熱的成立性、
- (4) 姿勢決定・姿勢制御精度
- (5) 局位置決定

である。これらをさらに AD2 分析し、地上検証・フライト実証の両面から必要な検証試験計画を考察した。気

球 VLBI はこれまでに例がなく、上記課題(1)以外は、フライト実証の形態で検証すべきと識別された。それらのフィージビリティスタディをおこなうのが、今回フライトに供する実験機である。特に(2)と(5)の検証には VLBI 観測そのものが必要となる。

4. 実験場に入るまでの開発

ゴンドラシステムの多くは、JAXA 宇宙科学研究所(相模原キャンパス)の電波天文グループ実験室・赤外線天文グループ実験室・気球工学実験室・構造機能試験棟でおこなわれた。吊った状態で姿勢制御をおこなって目標電波源の捕捉と指向追尾の実験をおこなった。また、ゴンドラが振り子運動で揺れる状態での VLBI フリンジの検出・追尾も確認した。姿勢制御駆動系、受信機、電源システム、気密容器群(エレクトロニクスや姿勢センサ、VLBI 機器等)など、熱真空試験が必要と思われるコンポーネントは、それぞれチャンバーに入れ、熱設計の妥当性の検証と動作検証をおこなった。VLBI 装置は、主に国立天文台水沢キャンパスで搭載仕様化された。主系の高速度サンプラーは NICT/国立天文台の地上開発品、主系の高速度データ記録システムは国立天文台水沢キャンパス開発グループの搭載用開発品、冗長系は NICT の地上開発品である。フリンジの確認、周波数標準源振の安定度測定が、国立天文台水沢 10m 鏡(および JAXA 臼田 10 鏡)等を用いておこなわれた。周波数標準の安定度は、国立天文台野辺山の 2 つのミリ波望遠鏡(大阪府立大学小川・大西研究室、前澤研究室)の間で 230 GHz でフリンジを検出したことでも確認された(PI: 山口大学藤澤研究室)。

電波望遠鏡の受信機の開発は主に大阪府立大学小川・大西研究室でおこなわれた。着水衝撃/フロートは、東京大学/岐阜高専と共同開発した。電源系構体の開発は山口大学藤澤研究室でおこなわれた。

5. 実験シーケンス (予定)

大樹町での技術検証は、まさに上空に VLBI 観測局を打ち上げ、電波観測をおこない、フリンジ検出を目指す形態でおこなう。

- (1) 大樹航空宇宙実験場から放球。ブーメラン飛行。
- (2) レベルフライトに入ったのち、振り子運動が収まるのを待つ。観測系の電源投入、システムチェック。
- (4) 地磁気計または GPS コンパスによる姿勢決定値(絶対精度 1 度角)をもとに、静止衛星 IPSTAR へ電波望遠鏡を指向。受信パワーをテレメトリで確認。
- (5) 姿勢決定モードを、地磁気計/GPS コンパス準拠から、電波望遠鏡の受信パワー & ジャイロ準拠へ移行。IPSTAR を追尾(精度 0.2 度角)。
- (6) VLBI 観測を実行。地上望遠鏡群も同時間帯に観測。観測時間は 1 秒間程度以上(最大 1 時間程度)。
- (7) 高精度姿勢決定値、局位置決定用加速度センサ

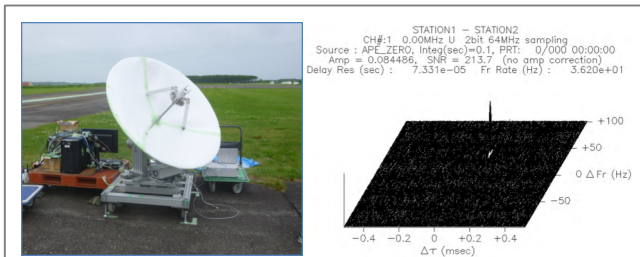
- のデータ、耐振り子制御モード等のデータを取得。
- (8) システム電源 OFF。落下。
- (9) 洋上にて回収。
- (10) 大樹実験場にて、観測データ吸い出し。
- (11) 国立天文台にて、干渉縞検出を確認(～1ヶ月)。
- (12) 干渉縞とセンサの結果を比較し、位置決定機能の検証(～数ヶ月)。

6. 実験場での放球準備

2016年の7月～8月のうちの約1ヶ月間、JAXA大樹宇宙実験場に滞在し、放球準備をおこなった。10tトラック1台を用いて、フライト実験機と可搬型地上VLBI局(“大樹町地上局”: 同型の1.5m鏡)を輸送して持ち込んだ。

6.1. 地上VLBI網の確立

フライト実験機のフルアセンブリをおこなう傍ら、大樹町地上局を用いて、本州の大口徑VLBI局群とのVLBI干渉実験をおこなった。ところが、IPSTARの大樹町への配信電波は、相模原や水沢、臼田で実験したときは偏波面(直線偏波)が異なっており、強度も弱く、フリッジ検出に難航した。結果的には、茨城大学32m鏡(米倉研究室)、国立天文台水沢10m鏡、JAXA臼田10m鏡、NICT鹿島34m鏡で構成されるVLBI網が結合された。大樹町地上局は相模原にて横偏波でフリッジを確認していた。大樹町現地では、縦偏波受信への改造をおこない対処した。本州の大口徑望遠鏡



左図: フライト実験中に同時にVLBI観測する予定の“大樹町地上局”。フライト実験機の干渉計機能の地上確認実験の相手局としても利用。
右図: 図: 大樹町地上局1.5mと国立天文台水沢10mとの間で検出された干渉縞。積分時間は0.1秒間、信号雑音比は213.7

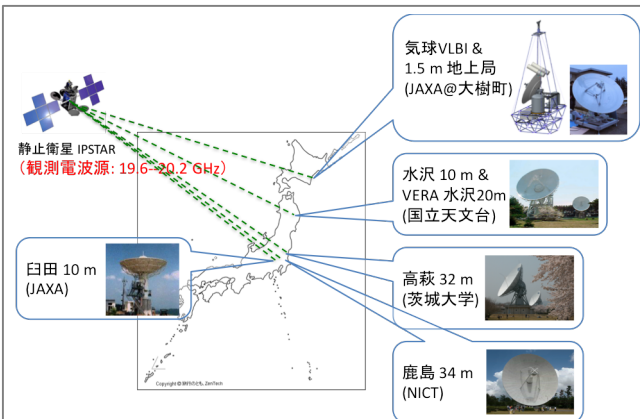


図: 同時に観測をおこなうVLBI網

はすべて円偏波受信であったため、直線偏波面にかかわらず受信できていた。ところで、気球局も円偏波受信(右旋/左旋の待機冗長)である。

6.2. フライト実験機アセンブリ

組立室にてアセンブリをおこない、各サブシステムの動作確認をおこなった。組立室開口部のシャッターからはわずかな空が見えるが、その方向に目標電波源であるIPSTARが存在するという幸運に恵まれた。おかげで、フライト実験機を組立室内でクレーンで吊りながら、観測試験をおこなうことができた。

エレクトロニクス等のコンポーネントを封入している気密容器x3は、上空環境に合わせた熱設計をしており、地上動作時には送風機で外壁を空冷しながらの運用となった。運用システムと観測システムについて、end-to-endでの動作を確立した。しかし、VLBIシステムの主系、加速度計システム、スタートラッカーとの通信を100%に確立することができなかった。VLBIシステムは冗長系があり、また加速度計とスタートラッカーはエキストラサクセスに必要なコンポーネントであったため、最低限の実験は実施可能であったが、課題を残した。

フライト実験機を野外に持ち出して、電波通信試験をおこなった。EMC対策をおこなっていたおかげで、運用時の最大電流をはるかに超える負荷を与えたが、コマンド・テレメトリ通信の状態は良好であった。また、通信ケーブルを実験中に故意に断絶させても、エラーを適切に処理できることも確認できた。

野外でおこなうことが必要なGPSコンパスを用いた姿勢粗決定・制御の機能確認は、試験コマンドの入力順ミスにより実験開始が遅れ、やがて雨天となり、完遂できなかった。姿勢粗決定系は、GPSコンパスと対となる冗長系である地磁気計での確立となった。

6.3. 姿勢制御実験

組立室内のクレーンでフライト実験機を吊り下げた状態で、姿勢制御性能の確認をおこなった。様々な過度な擾乱(大振幅振り子、吊り紐の1回転以上のねじ

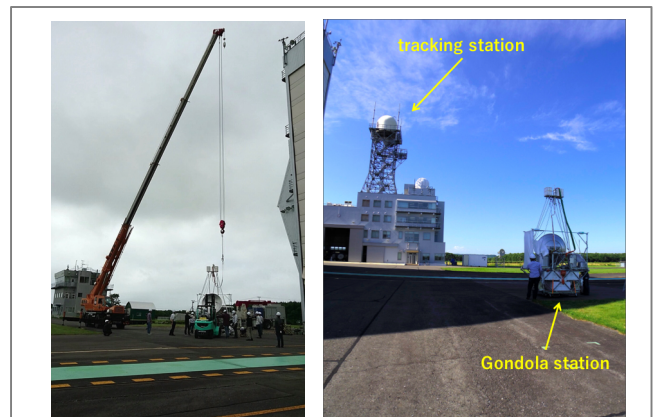


図: フィールドテストの様子。大クレーン吊り実験と電波通信試験。

れトルク等) を与えても、制御が暴走しないよう、アルゴリズムを整えた。どのような初期状態からでも、2 分間程度で目標角へ収束できることを確認した。

方位角の制御精度は、決定系からの目標角に対して $1\sigma = 0.035$ 度 (2.1 分角) であり、実験には充分である。しかし、PIVOT(より戻し機構) は、摩擦トルクが大きいためか、少々動きがぎこちない状況での制御であり、課題を残した。

望遠鏡仰角の制御精度は、決定系からの目標角に対して $1\sigma = 0.00063$ 度 (2.3 秒角) であった。仰角駆動部には NASA WASP でフライト実証された低摩擦ダイレクトドライブと同じ原理で開発したものが仕込んであり、その有効性を確認できた。ゴンドラの振り子運動を励振することなく、指向し続けた。

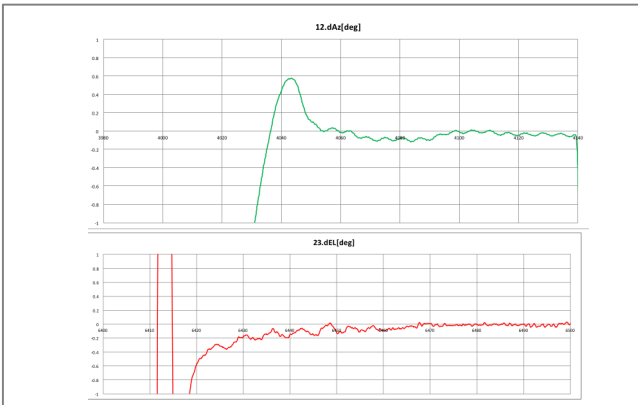


図: 姿勢制御結果。上: 方位角精度 0.035 度 (2.1 分角)、下: 仰角精度 0.00063 度 (2.3 秒角)。

6.4. 観測実験

組立室開口部シャッターを開き、フライト実験機を吊り下げた状態でシステムを動作させ、目標電波源 IPSTAR を自動補足・自動追尾する機能の確認をおこなった。地磁気計とエンコーダで大雑把な方向を指向し(精度 1 度角程度)、電波望遠鏡で空をスキャンしながら IPSTAR 電波強度を検波機で検出、同定したのちは検波器とジャイロの出力で制御にフィードバックをかけ、目標を追尾し続けることができた。前述のように、大樹町での IPSTAR 配信電波は強度が弱かったため、当初この観測モードは機能しなかった。検波器の実質感度の増幅を急遽おこない対処し実現した。それでもときおり目標を見失うことがあったため、さらなる改善が必要である。

また、フライト実験機と地上局との間でも VLBI フリンジを確認した。これは、観測システムが end-to-end で安定度も含めて確立していることを意味する。IPSTAR 電波強度は想定より弱かったが、干渉強度は充分であった。

7. 次年度の実験提案

以上のように、大樹航空宇宙実験場に滞在して準備作業をおこなったが、いくつかの課題を残しながら、天

候に恵まれず、放球はおこなわれなかった。システムは再び分解され、相模原キャンパスに持ち帰っている。現在、持ち帰った課題について、大気球グループと相談しながら、対処している。我々は、次年度シーズンにも放球を試みたい。

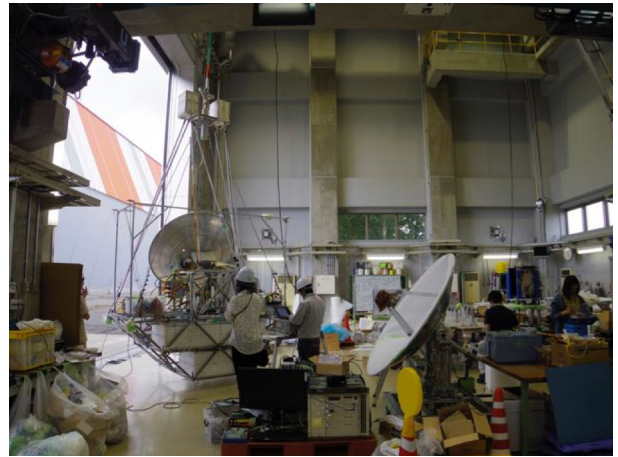


図: 大樹実験場の組立室の様子。シャッター開口部から見えるわずかな空の方向に、目標電波源の IPSTAR が位置するという奇跡。

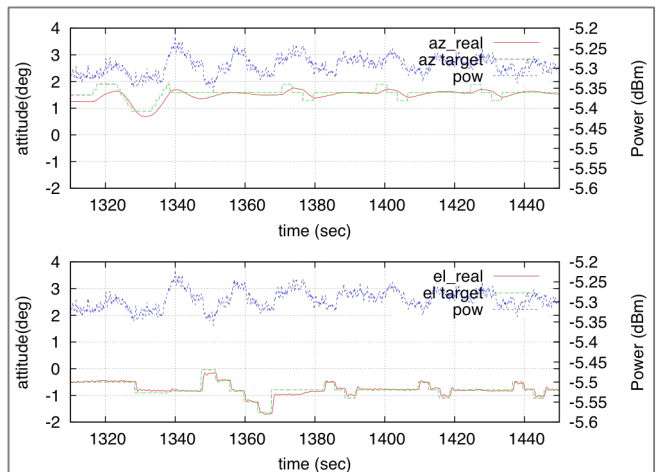
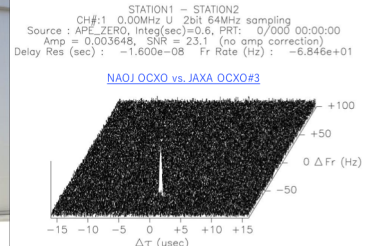


図: 自動捕捉から自動追尾に移行する前後の、姿勢角(緑: 司令値、赤: 実績値)と電波受信パワー(青)。上段は方位角、下段が仰角。1365sec 頃、探索から自動追尾に移行。



左図: VLBI 干渉実験時のフライト実験機 1.5m と大樹町地上局 1.5m。
右図: 検出された干渉縞。積分時間は 0.6 秒間、信号雑音比は 23.1。