

# 高速通信網と次世代衛星通信システムを利用した大気リモートセンシングの研究

鹿児島大学 理学部 西尾正則

Research and development on remote sensing techniques for atmospheric disturbances using high-speed communication networks and advanced satellite communication systems

Masanori NISHIO, Faculty of Science, Kagoshima University

**ABSTRACT:** To detect temporal and spatial irregularities of atmospheric water vapor distributions in real-time, we developed two types of observation systems; one is a VLBI using geostationary satellite beacons as reference signals, and the other a short-baseline interferometer using LEO (Low Earth Orbiting) satellite beacons as reference signals. Using these systems, we have promoted the study of structures and motions of the atmospheric water vapor affecting the radio interferometric observations. We have proposed a model for the atmospheric water vapor distributions.

## 1. はじめに

対流圏中の水蒸気の不均一な分布やその時間変化は、大気中を通過する電波の伝播時間揺らぎを生じさせる。この揺らぎは数 10ps 以上にも達し、センチ波やミリ波での地上からの天体観測、特に VLBI (超基線電波干渉計) による観測などにおいて必要とされる遅延時間の推定精度 (10ps 以下、時にはこれよりはるかに小さな値が要求される) を大きく上回っていることから、観測時における分解能の劣化や可干渉性の低下の主要要因となっている。また、GPS(Global Positioning System)による測地観測でも、必要とされる測定精度がセンチメートルを切るようになり、大気による伝播時間揺らぎが無視できない状況となってきた。

本研究開発課題では、大気水蒸気密度の時間ゆらぎと空間ゆらぎの高精度検出を目的として、高速通信網と計算機システムを組み合わせさせたシステムを基盤とした電波干渉計を開発した。また、開発した装置により得られたデータをもとに大気水蒸気密度の揺らぎとその動きに関するモデルの検証、再構築も行った。

## 2. 測定原理とシステム

本研究開発課題で開発したシステムは、大気水蒸気密度の時間ゆらぎを測定する装置及び大気水蒸気の空間密度分布を測定する装置の 2 つで構成されている。前者は、静止衛星のビーコン電波を実時間 VLBI により測定する方法を利用しており、後者は、LEO 衛星のビーコン電波を結合型電波干渉計により測定する方法を利用している。それぞれの装置による大気水蒸気分布の揺らぎの測定概念を図 1 及び図 2 に示す。以後、前者の装置による方法を「実時間 VLBI による測定法」、後者の装置による方法を「LEO 衛星による測定法」と呼ぶ。

実時間 VLBI による測定法では、それぞれのアンテナの上空を大気水蒸気塊が風に流されて移動していくときに起こる伝播遅延時間の揺らぎを測定する。測定される量は 2 点での遅延時間の揺らぎの差分量として得られるが、遅延時間の揺らぎは遠く離れた 2 点間では独立しており、一方のアンテナの上空の揺らぎのみが大きいときにはそのアンテナ側の上空の揺らぎを代表していると考えられる。開発した装置は、高精度・実時間測定をなるべく簡便に実現するために、既存の VLBI 受信装置に汎

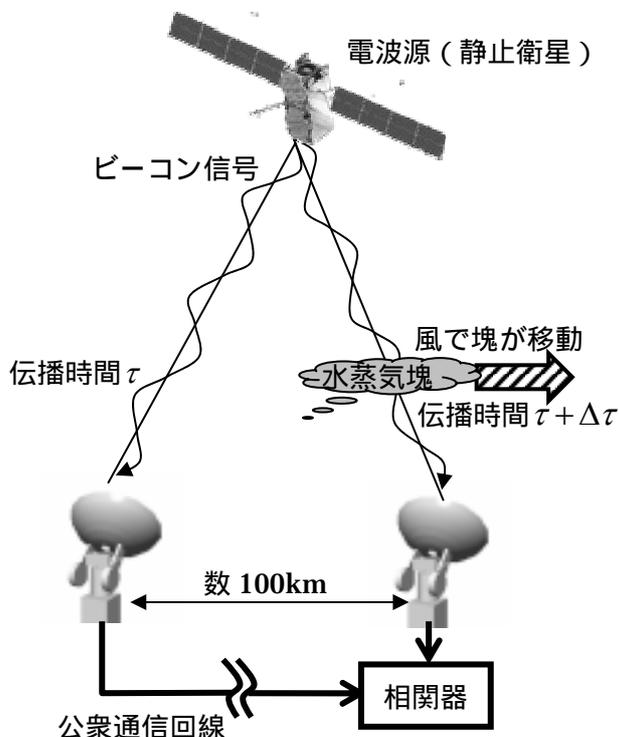


図1 実時間 VLBI による測定法

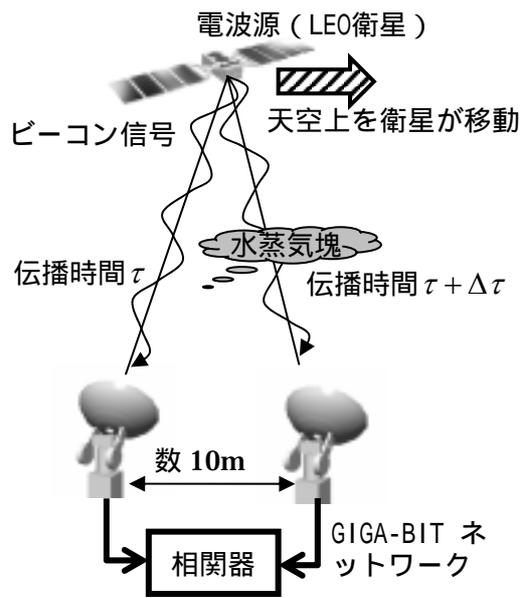


図2 LEO 衛星による測定法

用の PC を基盤としたデータ収集・通信・相関処理装置を付加する装置構成をとった。データ通信は、現状においては VLBI 観測局がデータ通信インフラの整備されていない場所に設置されている可能性も考慮し、電話回線や ISDN などの汎用通信回線を利用して行うことが可能な方式及び通信速度とした。また、観測中の回線切断などに対しても自動的かつ安定にデータ伝送ができるように、ソフトウェアの設計を行った。

LEO 衛星による測定法では、小口径アンテナで構成される電波干渉計により、天球上を高速に移動していく LEO 衛星のビーコン電波を受信し、アンテナ間での電波到来時間の変動から衛星の移動する軌跡に沿った大気伝播遅延時間のゆらぎを求める。LEO 衛星としては、低軌道衛星通信システムの一つである Globalstar システムの衛星群を利用している。このシステムでは各衛星の可視時間は約 20 分であるが、合計 48 機の衛星でシステムが構成されていることから常時衛星のビーコンを受信することができる。開発した装置では、各アンテナにデータ収集用の汎用・高速 PC を装備し、高速のネットワークでアンテナ間を結び分散データ処理方式を採用した。この方式は、将来、観測装置のアンテナを多素子化した場合に、より効果を発揮することが期待される。LEO 衛星は天球上を高速で移動するため、受信点における周波数のドップラーシフトも大きい。開発したシステムでは、位相情報を保持しながらドップラーシフトの補正処理を行い、かつこれをできるだけ単純な装置構成で達成するために、

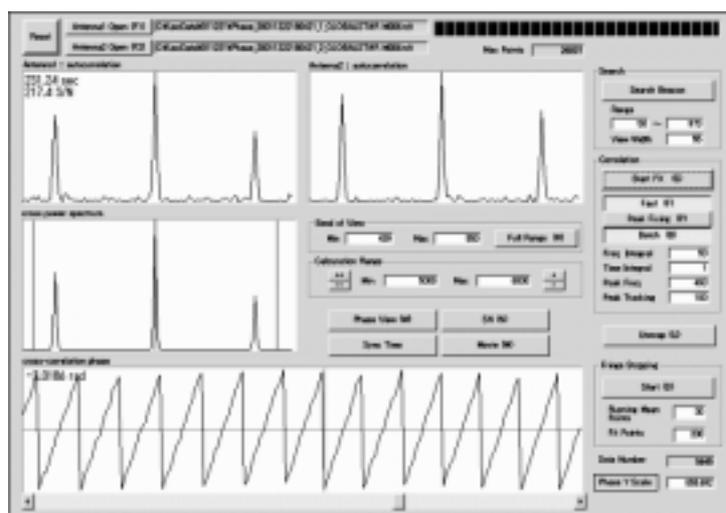


図3 相関処理ソフトウェアの実行画面。最上段の窓が2台のアンテナの受信信号スペクトル、中段の窓が相関スペクトル、最下段の窓が相関位相の時間変化を表す。

データを計算機に取り込んだ後にソフトウェアにより周波数補正を行う方法を採用した。受信した信号間の相関処理もソフトウェアにより行い、アルゴリズムとしてはFX方式を採用した。図3に相関処理ソフトウェアの実行画面を示す。この方式をとることにより、各アンテナでのビーコン受信状態の監視と相関位相の計算を同時に、かつ実時間で実行させることができる。

### 3. 観測結果

図4に、実時間 VLBI による測定法で得られた結果の例を示す。この図は、鹿児島 6m アンテナ局と水沢 10m アンテナ局により、静止衛星 NSTAR-A のビーコン（観測周波数 19.4GHz）を 24 時間連続観測し

たときのものである。図3(a)、(b)は、それぞれ晴天時、雨天時の干渉位相の時間変動である。各図の縦軸は干渉位相、横軸は時間を表す。2つの測定結果を比較すると、雨天時の方が緩やかな位相変動、それに重畳する細かい位相変動ともが大きくなっていることがわかる。測定システムに起因する誤差の定量的解析を行い、それらが測定結果に見られる位相変動に比べて十分に小さいことがわかった。このことから、測定結果にみられる位相揺らぎは大気によるものといえる。

図5にLEO衛星による方法で得られた結果の例を、図6にこのときの衛星の天球上での軌跡を示す。図5の縦軸は干渉位相、横軸は観測時間を表している。横軸は、衛星の軌道情報を用いて天球上の衛星の位置に対応付けることができる。図5には、周期数秒以下、変動幅1度(p-p)程度の位相揺らぎに加え、周期10数秒、変動幅2度(p-p)程度の位相揺らぎが見られる。このことから、大きな揺らぎを引き起こす領域が空間的に局在していることがわかる。電波天文学で広く知られている Closure Relation の関係を使い、観測データに含まれる雑音成分の大きさを推定すると、測定された位相揺らぎの1割程度であった。このことから、上に述べた位相揺らぎの2つの成分とも、大気に起因するものであるといえる。

### 4. 大気水蒸気の密度揺らぎのモデル

実時間 VLBI による測定法及びLEO衛星による測定法で得られた観測データを解析し、(1)気象状態と大気伝播遅延時間揺らぎの振幅には相関関係があり、その振幅は晴天時、曇天時、雨天時の順に大きくなっている、(2)大気伝播遅延時間揺らぎの振幅は、観測点から見た衛星の仰角が低くなるにしたがって大きくな

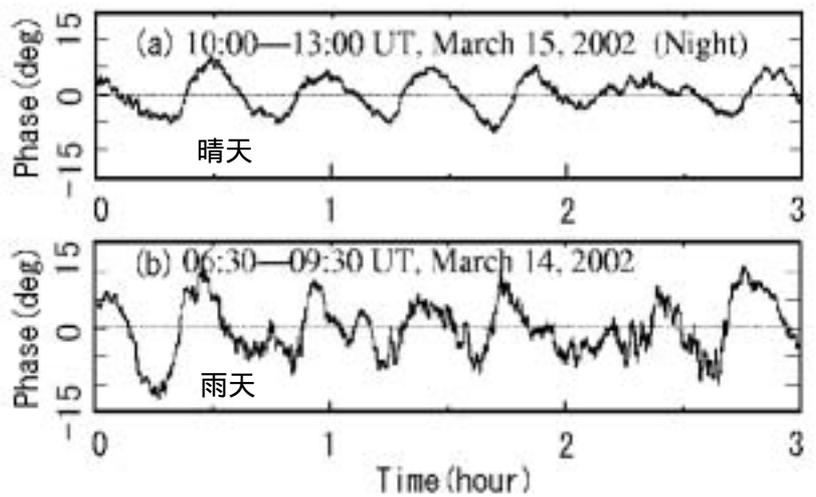


図4 実時間 VLBI による方法で測定した大気位相揺らぎ

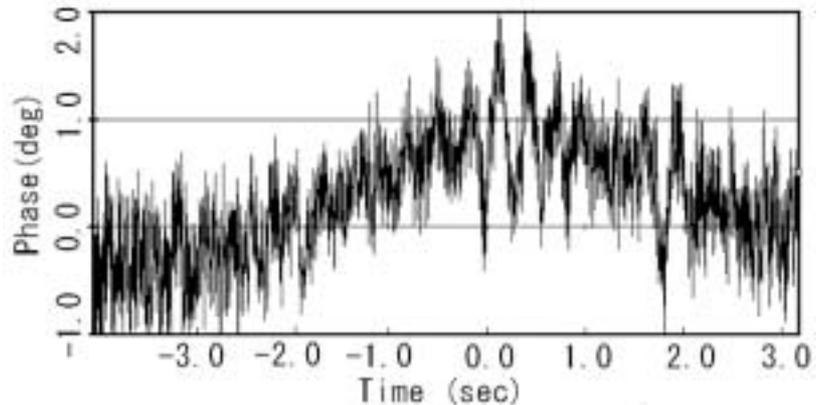


図5 LEO衛星による方法で測定した大気位相揺らぎ

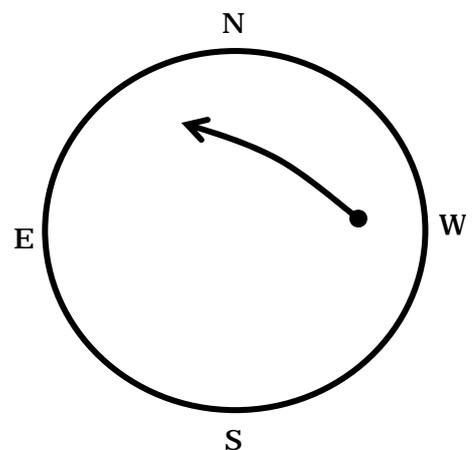


図6 天球上でのLEO衛星の軌跡

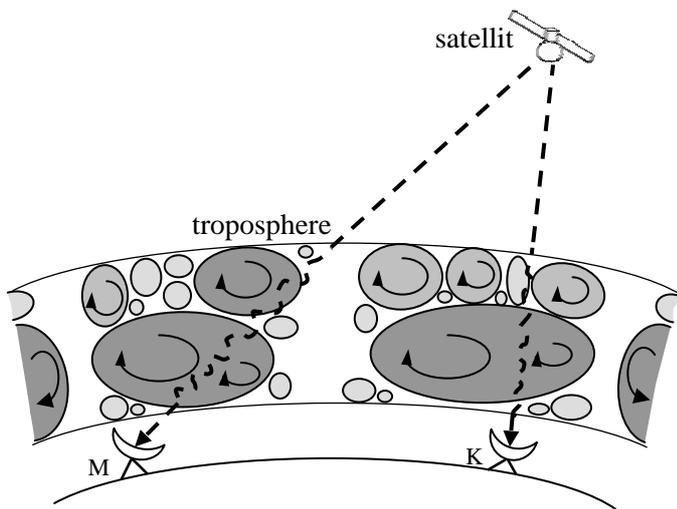


図7 観測結果を元に描いた対流圏上層の大気水蒸気分布のモデル

し、また水蒸気塊内部における擾乱運動を組み込むことにより説明できる。図7に、観測結果を元に描いた対流圏上層の大気水蒸気分布のモデルを示す。

## 5. ネットワークの活用について

実時間 VLBI による測定法のために開発した装置は、この装置を国際 VLBI 観測における大気状態の実時間監視へ応用することを視野に入れ、さらには観測局がデータ通信インフラの整備されていない場所に設置されている可能性も考慮して、電話回線や ISDN などの汎用通信回線を利用できるように設計している。また、この装置をなるべく広く普及させることを目指して、汎用の PC 等によりデータ収集・データ処理を行う方式をとっている。本装置は、より広帯域のネットワークでの運用へ拡張・発展させることが可能であり、広範に普及させるための手法の開発という観点で、通信総合研究所や国立天文台で進められている超広帯域ネットワークを利用した実時間 VLBI 実験と相補的な関係に位置付けることができる。

LEO 衛星による方法のために開発した装置では、結合型電波干渉計（短基線電波干渉計）を構成するアンテナ間に高速のネットワークを張り巡らし、各アンテナにおいて受信信号をデジタル化してから、相関処理装置に伝送する方式を世界で始めて採用した。この方式を採用したことで、各アンテナ間の信号の引き回し及び各アンテナで受信した信号を処理する中央処理部の装置構成を単純化することができ、干渉計システムとしての拡張性が大きく向上した。また、計算負荷の分散を図ることができた。現状において観測帯域を制限しているのは通信回線の速度である。今後、より広帯域のネットワークが安価に導入可能になると予測され、本装置で採用した方式が天文観測装置に広く普及することが期待できる。

## 6. まとめ

本研究開発課題により、大気伝播遅延時間揺らぎを測定するための2つの異なる装置を開発した。開発した装置による観測から、電波天文観測における観測状態を監視するためのシステムならびに大気水蒸気の空間分布を観測するシステムとして実用化が可能であることを確認できた。また、従来の大気水蒸気分布のモデルを一部修正したモデルにより2つの装置により観測した結果を説明できることがわかった。

る特性（secZ 効果）を示す、(3)空間的に局在して、大きな大気伝播遅延時間揺らぎを生じさせる領域がある、(4)揺らぎを引き起こす水蒸気塊の大きさは最大で 10km 程度である、(5)実時間 VLBI による測定法で捉えられた数秒以下の変動周期の揺らぎは、従来提示されているモデルから予測される周期-振幅関係とは異なった特性を示す、という結果を得た。

大気伝播時間揺らぎは、従来、薄いスクリーン状の水蒸気塊が形を変えず風に乗って移動していくというモデル（Phase Screen モデル）で説明されていた。今回の観測結果は、ある程度の厚みを持った水蒸気塊を導入

## 7. 研究実施体制

### 1) 実時間 VLBI 法による大気計測システムの開発

鹿児島大学工学部	宮崎智行
国立天文台地球回転研究系	亀谷 収

### 2) LEO 衛星を利用した大気計測システムの開発

信州大学理学部	角野由夫、加藤千尋
科学技術振興事業団研究員	鈴山智也

### 3) 電波による大気構造の解析法の研究

国立天文台地球回転研究系	笹尾哲夫
鹿児島大学理学部	面高俊宏
信州大学理学部	鈴木啓助

#### 研究協力者

国立天文台電波天文学研究系	中島 弘、梅本智文、井上 允、小林 秀行
国立天文台地球回転研究系	河野宣之、
鹿児島大学工学部	劉 慶会

#### 招聘研究協力者

中国科学院ウルムチ天文台	張阿麗、劉祥
--------------	--------

謝辞 本研究開発課題の推進にあたり、科学技術振興事業団および鹿児島大学の関係者の方々に多大な協力をいただきました。また、関係する研究室の大学院生・学部生にも、研究推進にあたり協力をいただきました。ここに感謝いたします。