

低軌道衛星を利用した地球大気水蒸気揺らぎの測定法について

鹿児島大学工学部技術部 南竹 力

大気圏外から到来する電波の位相揺らぎは、電波天文観測、特に電波干渉計での観測において分解能や可干渉性の低下の主要要因である。この位相揺らぎは主に大気中の水蒸気成分の空間的及び時間的な変化により発生している。この位相揺らぎを計測することは、電波干渉計の精度向上や気象学での大気水蒸気の解明に役立つことが期待できる。低軌道(LEO)衛星からのビーコン波を2つの離れた位置にあるアンテナで同時に受信することにより、光路上の水蒸気量の違いから生じたビーコン波の到達時間差をアンテナ間の位相差として測定することができる。図1は観測システムの概略図である。

LEO衛星のビーコン波が大気を通過するとき、到達時間に差が生じる

$$\phi_{obs} = 2\pi f \tau_g + 2\pi f (\tau_{a1} - \tau_{a2}) = \phi_g + \phi_{at}$$

τ_{a1}, τ_{a2} : 大気水蒸気による遅延

τ_g : 幾何学的遅延

LEO衛星は携帯電話システムのグローバルスターのビーコン波を使用した。ビーコン周波数は、6.85GHzであり、グローバルスターシステムは48個のLEO衛星によって構成され、高度は1400kmであり、各衛星は、約20分間で観測サイトの上空の半球を横断する。観測サイトで、常時48個の内1つの衛星を3つのアンテナで追跡し、その干渉位相揺らぎを観測した。3機の衛星追尾用アンテナ(口径1.4mパラボラ)を、理学部1号棟の屋上に東西方向に設置されている。

図2にパラボラアンテナの写真を示す。

アンテナは東西方向に配置され、基線長は最大48m、最小8mである。図3はLEO衛星の天球上の軌道マップである。LEO衛星が天球上を短時間に様々な軌道をもって移動するので、測定を繰り返すことにより大気中の水蒸気による揺らぎの二次元分布を見積もることが期待できる。

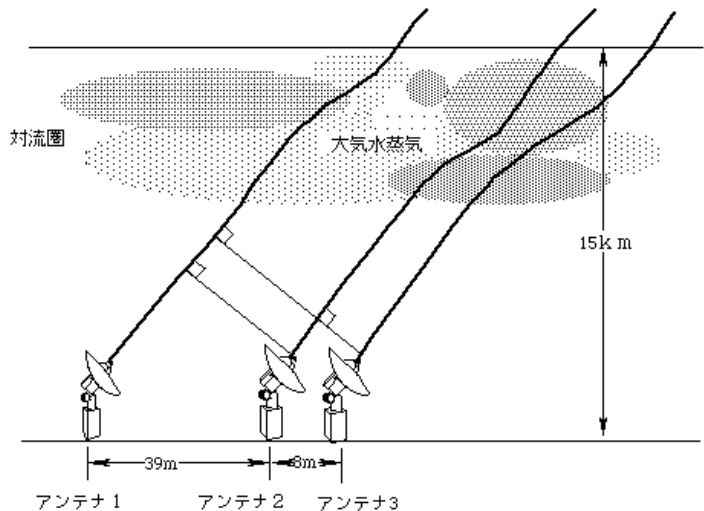


図1 観測システムの概略図

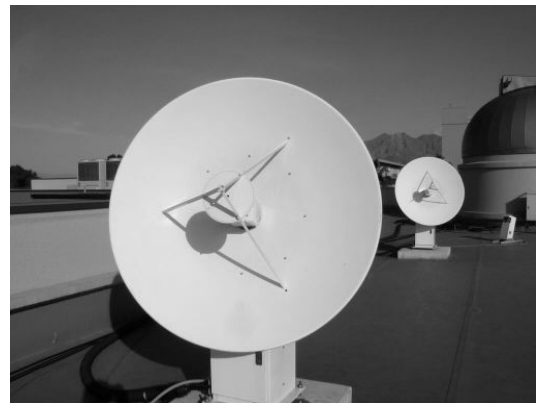


図2 パラボラアンテナ

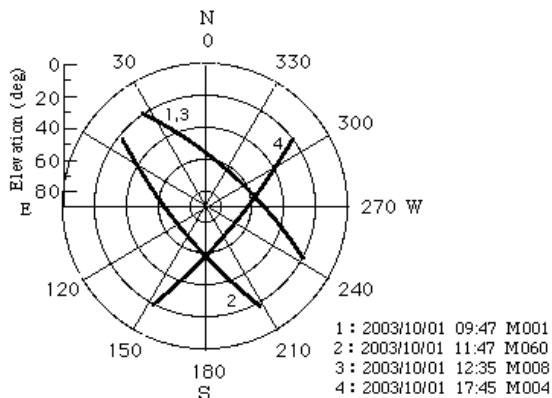


図3 天球上のLEO衛星の軌道マップ

図4に観測システムのブロック図を示す。LEO衛星のビーコン波6.876MHzは1MHzに周波数変換され、A/D変換器を通して、フーリエ変換され相関処理を行う。

各アンテナでのビーコン波方法で時刻 t のアンテナ1, 2における受信信号の電圧をそれぞれ $E_1(t)$, $E_2(t)$ とし、周波数を f とすると、クロスパワースペクトル $X(f)$ は、
$$X(f) = F(E_1(t)) \cdot \{F(E_2(t))\}^*$$
で求められる。ここで、 $F(x)$ はフーリエ変換の演算を表す。また、 $*$ は複素共役をとることを表す。

図5に位相揺らぎの時間変化の1例を示す。横軸時間(0~500sec)であり、位相揺らぎは最大で $\pm 0.2\text{rad}(\pm 11\text{deg})$ 程度の揺らぎが見られる。位相変動の振幅を評価する方法として、位相変動のアラン標準偏差(ASD: Allan Standard Deviation)が使われる。アラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)$ は、

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{\langle [\phi(t+2\tau) - 2\phi(t+\tau) + \phi(t)]^2 \rangle}{2(2\pi\nu_0\tau)^2}}$$

ν_0 は観測周波数の中心値、 $\phi(t)$ はある瞬間の位相、 $\langle \rangle$ は時間平均をとることを表す。変動周期 τ は通常、平均化時間と呼ばれる。図6にLEO衛星の移動角と位相揺らぎの関係(アラン標準偏差)を示す。

この図から数度程度の広がりを持った構造がみられる。これまでの観測でLEO衛星ビーコンの位相変動は大気の水蒸気の不規則な密度揺らぎによって引き起こされ、LEO衛星の軌道空間上での大気の水蒸気揺らぎが移動角1~4度程度の広がりを持つことがわかった。また、地上気象との相関を調べ、観測地点の気候状態と関係があることを明らかにできた。

参考文献:

南竹 力, “干渉計型LEO衛星追跡システムによる大気水蒸気密度揺らぎの空間構造の研究” 鹿児島大学理工学研究科, 修士論文, FEBRUARY, 2004

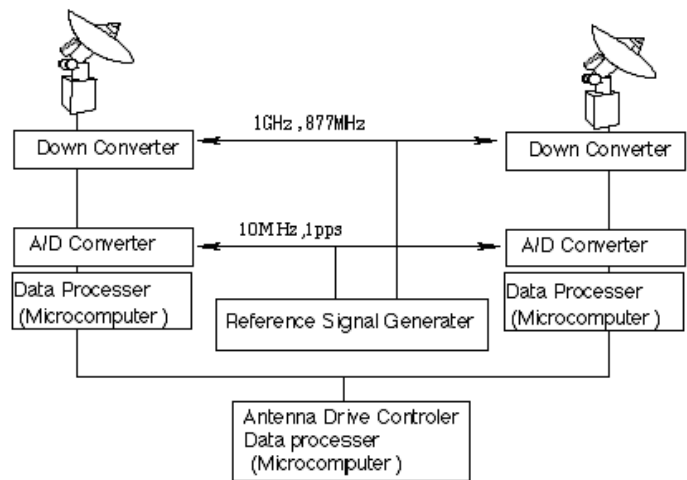


図4 観測システムのブロック図

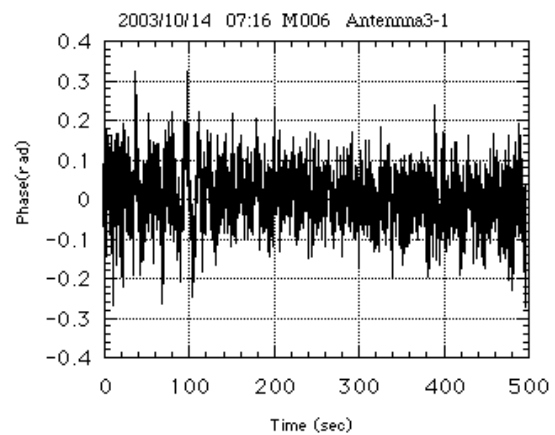


図5 位相揺らぎの時間変化

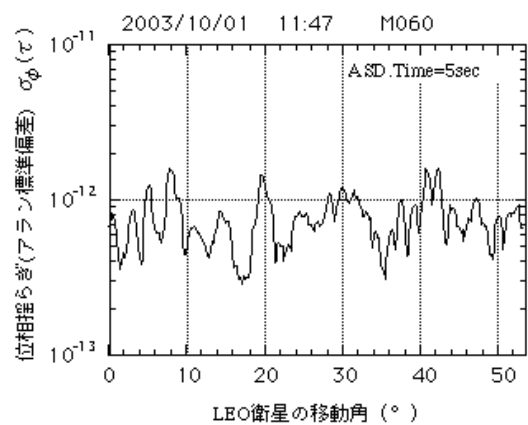


図6 アラン標準偏差による位相揺らぎの時間変化