

V-6. 対流圏, 電離層, 地球潮汐の影響の補正

川尻 轟大*

CORRECTION FOR THE EFFECTS OF THE TROPOSPHERE, THE IONOSPHERE AND THE EARTH-CRUSTAL TIDE

By

Nobuhiro KAWAJIRI

1. はじめに

V L B I の測定データは, 本特集号, 第三部で触れたように, 種々の補正が必要であるが, 大きく三つに分けられる。すなわち, 伝搬遅延時間 (τ_p), 局内遅延時間 (τ_i) そして時刻同期誤差 (τ_e) である。このうち, 後の二つの補正については, 観測者自身の手の届く範囲にあるともいえ, 近い将来, かなりの精度 (0.1 n sec のオーダー) まで補正可能と思われる。今後は, 最初に挙げた伝搬遅延時間 (τ_p), すなわち, 大気の影響のうち, 電離層や対流圏によって伝搬路位相速度が真空中を伝わる場合と異なる, いわゆる excess phase path の影響と, 最近ようやく可能になりつつある, アンテナの載っている大地の動き, すなわち, 地球潮汐によるアンテナの位置の動きの検出が残された問題である。特に対流圏と地球潮汐の影響は, V L B I の測地精度を左右する最終因子となるうと考えられている。本章では, これらの問題点について, 文献等で知り得た点について触れてみよう。

なお, ほかに, 磁気圏や惑星間, 星間プラズマの影響も無視できない, とする意見もあるが, 地球上の基線両端から電波星を見た場合, 宇宙空間のスケールに比べるとほぼ同じような視線によると考えられるので, シンチレーションを問題にする場合を除けば, 特に問題はないのではなかろうか。

2. 大気による影響の補正

V L B I 実験では, 宇宙の果ともいえる数十億光年のかなたの準星から, 近くは赤道上空3万6千kmに“静止”する人工衛星まで, 種々の電波源を用いる。これらの電

波は, アンテナで受信されるまでに地球を取り巻く大気(狭義の), 電離層を通過し, 宿命的にその影響を受けることになる。本章では地球大気のうち, 特に影響の大きい電離層及び対流圏について考察する。

既に本特集号, III-1. V L B I データの処理の 5. で大気の excess phase path に関して述べてあるので, 本節では, 電波伝搬に主として影響を与える, 水蒸気, 酸素に関する測定法, それと位相変動との関係等につき 2~3 の論文を紹介する。

2.1 赤外線による水蒸気量測定と位相変動の関係⁽¹⁾

米国国立電波天文台 (NRAO) が計画している VLA (Very Large Array) 建設の際の各アンテナ間の (最大スパン35km) の位相のゆらぎについて予測データをを得る目的で, NRAO の干渉計を用いて本測定が行われた。

観測方法は, 3素子の電波干渉計 (スパン900m, 1800m, 2700m など) とそれに対応する三つの赤外線湿度計 (infrared hygrometer) を用い, 前者の位相のゆらぎと, 後者による水蒸気量との相関現象が調査された。赤外線湿度計は, 太陽を赤外線源とし, その水の吸収線の振幅を測定するので, 電波干渉計のアンテナも視線方向を近付けるため, 太陽近くの電波源を選ぶ必要があり, この測定では太陽から約3°離れた3C49を用いている。

電波干渉計は受信周波数2695 MHz, バンド幅10 MHzで, 各アンテナのローカル周波数は共通の発振器に位相ロックされている。相対位相決定誤差は5°程度であった。

一方, 赤外線湿度計の方は, 次の原理による。水蒸気の赤外線 9350 A 吸収線を測定する。別のチャンネルで, 水蒸気があまり吸収しない 8800 A の測定を行ない, 9350 A の強度との比をとることにより, 視線方向の水蒸気量がわかる。

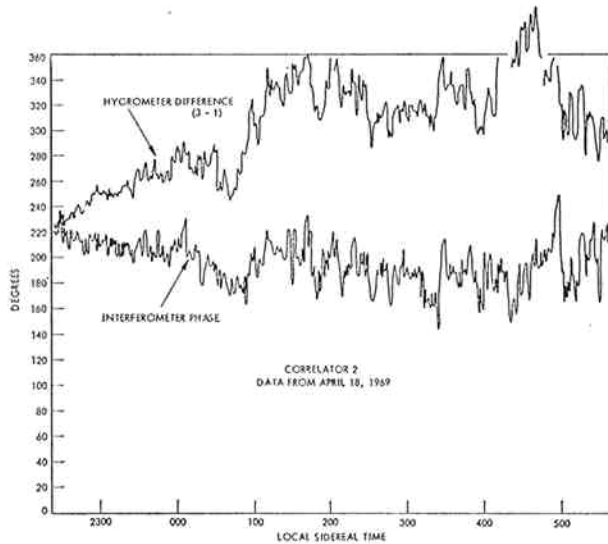
*鹿島支所 第三宇宙通信研究室

第1図に、赤外線湿度計の3と1の差を、降雨量換算1mmにつき20°の割合で表した位相差と、電波干渉計による相対位相の変化の関係を示す。両者の開きはあまり問題ではなく、個々の時間変化の対応に興味がある。特に時間変化が一致している部分を抜き出したのが、第2図である。

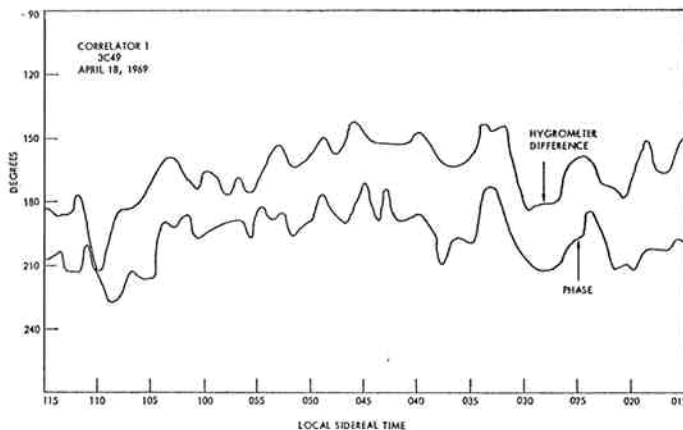
結論として、電波干渉計の位相は細かい点では、時間的に一点一点補正できるとは思えないが、位相のゆらぎの量は、電波望遠鏡と電波源との間のパスに沿った大気中の水蒸気を測定することによってかなり推測できることを示している。

2.2 22 GHz 水蒸気線測定による対流圏伝搬路長変化の推定

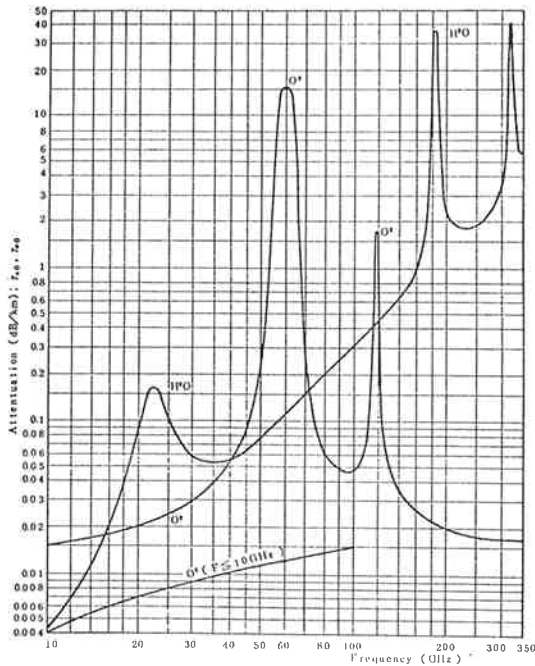
Schaper 等⁽²⁾は、対流圏伝搬路長の変化について数値計算であるが、かなり大胆な数字を示している。主な部分を引用すると、以下のとおりである。対流圏伝搬路長の変化を知るためには、地表付近の気象的パラメータ(温度、気圧、相対湿度)のほか、大気中の温度構造と、高域の水蒸気の分布測定が必要である。これらの大気のパラメータの影響は、水蒸気の共鳴線である22.235 GHz 付近の大気の熱輻射及び酸素の60 GHz 付近の共鳴バンドを測定することによって検出可能となる(第3図参



第1図 干渉計の相対位相と赤外線湿度計の差による時間変化の比較。赤外線湿度計は降雨量1mm 当り位相20°に換算した。基線長は1800m。



第2図 第1図のような比較のうち特に相関のよい部分の例。基線長2700m。



第3図 水蒸気、酸素分子の吸収による減衰特性。
 圧力：760mmHg，温度：20℃，水蒸気：7.5g/m³

照)⁽³⁾。

Westwater⁽⁴⁾によると、22GHz付近の熱放射の1周波の測定と、二つのラジオゾンデの記録からの計算を基に、天頂方向での水蒸気による excess phase path の寄与は 0.8 cm の誤差で予知できるとしている。

天頂方向の対流圏の伝搬路への寄与は、一般に2ないし3mであり、その決定精度は10%程度である。これは、excess phase path を推測させる(準)ミリ波帯の輝度温度に影響を与える電波の吸収係数の精度は10%程度にとどまるからである。この2mに対し10%という数字は大きいようだが、実際には干渉計として両アンテナへの伝搬路の差だけが問題となるので、この数字は受け入れられよう。

さて、一般に大気(電離層の影響を除く。)による excess phase path ΔL は30GHz以下では、次式で表される⁽⁵⁾。

$$\Delta L = \int_L (n-1) dl, \quad \dots\dots(1)$$

$$(n-1) = \frac{7.76 \times 10^{-5}}{T} (P_d + 4.8 \times 10^3 \frac{e}{T}) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 n : 屈折率、 T : K、 P_d : 全乾燥空気気圧(mb)、 e : 水蒸気分圧(mb)、 l : 伝搬路、である。

伝搬路長の平均値は、主として乾燥空気によって決定されるが、その変化は(2)式からわかるように、大気中の水蒸気量に依存していることがわかる。

第1表 天頂方向の大気による伝搬の推定

伝搬路長推測のための測定	推定伝搬路長の RMS 誤差 (cm)	
	夏	冬
測定無しの実験的天頂方向伝搬路の標準偏差	4.4	2.2
地表付近の気象データ(温度、気圧、相対湿度)を測定した場合	3.7	2.0
地表付近の気象データに加えて22及び24GHzの輝度温度測定をした場合	1.4	1.0
地表付近の気象データに加えて22, 24, 52.65, 53.60 GHzの輝度温度測定をした場合	1.1	0.8

第1表に、種々の測定による天頂方向の伝搬路長決定の際の誤差の値が示されている。天頂以外の方向では天頂角距離80°以下ならば、その secant を第1表の値に掛けてもらえばよい。これらの計算結果によれば、雲が無い場合、水蒸気の共鳴線付近の2周波の天空輝度温度測定と、地表の気象パラメータを得ることにより1~2cmで天頂方向の大気による寄与が決定される。(他の計算によると、典型的な雲の影響は、天頂方向の場合、上の表の値にそれぞれ0.5cm R.M.S. 誤差が加わるに等しいとのことである。)夏の場合、測定無しの実験的な値に対して倍良くなり、地上の気象パラメータの測定のみの場合に対し2.2倍良くなっている。O₂バンド付近のラジオメータ測定を行えば更に、もっと良い結果が得られる。

2.3 対流圏と電離層による影響の比較

電離層の影響は、Cバンド以上の比較的高い周波数で実験を行うか、2周波で行なえば(屈折率の周波数依存性を利用して)かなり軽減することができるが、対流圏の場合は補正が難しいとされている。ここでは、電離層による excess phase path について記述した後、対流圏の影響と比較してみる。

(1) 電離層による excess phase path⁽⁶⁾

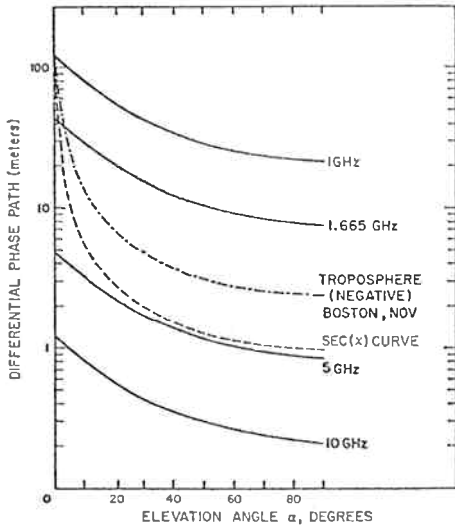
電離層は高度の分散性媒質であり、その屈折率 n は周波数 f の逆数を使って、次式のように展開できる。

$$n = 1 - K_1 \frac{N}{f^2} \pm K_2 \frac{NB \cos \theta}{f^3} - \left[K_3 N^2 + K_4 NB^2 (1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta) \right] \frac{1}{f^4} + \dots\dots(3)$$

ここで、 N : 電子密度、 B : 地球磁場、 θ : 波面法線と地磁気とのなす角、 K_i : 定数、である。

式(3)からわかるように周波数 f が大きくなればそれだけ電離層の影響が小さくなる。そこで f^{-3} 以後の項を無視すると excess phase path (1) は、

$$|\Delta L| \approx \frac{K_1}{f^2} \int N dl$$



第4図 アルファチャプマン層を仮定した電離層による Differential Phase Path

と与えられる。ここで(2)式と(3)式を比較してその符号が反対になることに注意しよう。

第4図に、周波数をパラメータとして、仰角 α と excess phase path ΔL (Differential phase path ともいう) との関係を示す。ここで電離層のモデルとしてアルファ・チャプマン層 (電子の消滅を再結合 α のみによるとする) を仮定している。第4図からわかるように、excess phase path は $1/f^2$ にほぼ依存していることはもちろんだが、天頂角 χ の sec χ 曲線とは、仰角が低い場合以外は傾向がよく合っている。比較のため、対流圏による excess phase path も記入されているが、これは先に述べたように符号が逆である。電離層の影響は 5 GHz 以上では対流圏の影響より大分小さくなるが、1 GHz 以下でははるかに大きくなる。10 GHz 以上では 1 m 以内となる。

第2表に、地球磁場の影響を考慮した場合としない場合について、differential phase path の計算例を示す。この場合周波数は 1 GHz で電離層はアルファ・チャプマン層を、地球磁場はダイポール磁場を仮定している。第2表からわかるとおり地球磁場を無視した場合は、正常波と異常波それぞれの場合の中間に相当し、かつその違いは 1 GHz でも 10 cm 以下である。周波数が高くなればもっと小さくなる。

(2) 実際の補正例

上記のような対流圏及び電離層による excess phase path を、実際の V L B I 観測の際に補正した例について紹介する。

これは、アメリカ合衆国東岸の Agassiz (マサチューセッツ州) と西岸 Owens Valley (カルフォルニア州)

第2表 電離層による differential phase path への地球磁場の影響。アルファチャプマン層、ダイポール磁場を仮定、周波数は 1000 MHz。

仰角 (度)	Differential phase path (m)		
	磁場なし	磁場あり	
		正常波	異常波
0	122.17	122.10	122.25
10	83.29	83.24	83.35
20	58.60	58.55	58.64
30	44.01	43.98	44.04
40	35.28	35.25	35.31
50	29.69	29.67	29.72
60	25.18	25.15	25.20
70	24.06	24.04	24.08
80	22.55	22.53	22.57
90	21.36	21.34	21.38

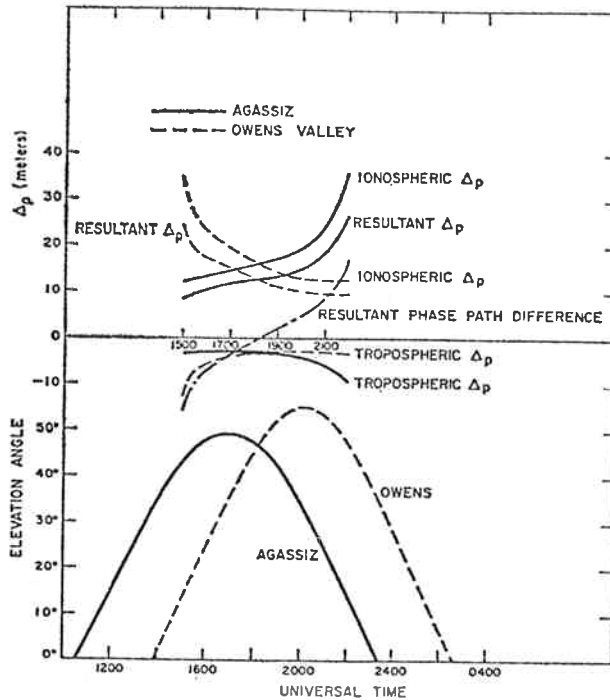
との間で、周波数 1665 MHz で電波源 3C 273 を観測した際のものである。観測時期は 1969 年 11 月末で、各観測所では 12 時間位見えるが、両方共通に仰角 15° 以上の時間帯は約 7 時間 (1500—2200 U. T.) であった。

第5図⁽⁶⁾に、対流圏及び電離層による differential phase path ΔP ($-\Delta L$, (1)式参照) の観測時間による変化が、仰角変化とともに示されている。第5図からわかるように、Owens Valley のトータルな ΔP は時間とともに減少し、Agassiz の場合は逆に増加している。これらの変化は観測時間とともに変わる仰角の変化ないし電離層の状態の変化に依存している。

遅延時間測定 (両アンテナへの電波到達時間差測定) への補正は、結局、両局のトータルな ΔP の差 ($\Delta P_{Agassiz} - \Delta P_{Owens}$, 図中の鎖線) で表される。この補正は、初め負の値をとるが後、正となり、 $\pm 15m$ 位変化する。この補正值は、両局の仰角が、ほぼ等しいところでゼロとなることは注目すべきことである。すなわち、このようなときの観測データは大気の補正が小さくて済む。もっとも、補正值ゼロの時間は、両局における電離層の状態に左右されることはもちろんである。

上記 2.1~2.3 に関連して、大気中の電波伝搬と位相との関係を取り扱った論文として、以下のようなものがある。更に深く探究される向きは参照して頂きたい。(Baars⁽⁷⁾, Basart, et al.⁽⁸⁾, Deam, et al.⁽⁹⁾ Weisbrod and Anderson⁽¹⁰⁾, Herbstreit and Thompson⁽¹¹⁾)

対流圏の影響の検出には、上記のように、22 GHz の水蒸気線や 60 GHz 付近の O_2 線を測定する方法、赤外線を観測する方法のほか、レーザのバックスキヤッターを利用する方法⁽⁶⁾も考えられているが、やはり、本章 2.2 で述べた 22 GHz の水蒸気線等を観測する方法が、電波を



第5図 1968年 Oct.-Nov. の Agassiz-Owens Valley 基線による
3C273 観測の際の excess phase path の補正。

利用するという点で最も信頼がおけるのではなかろうか。

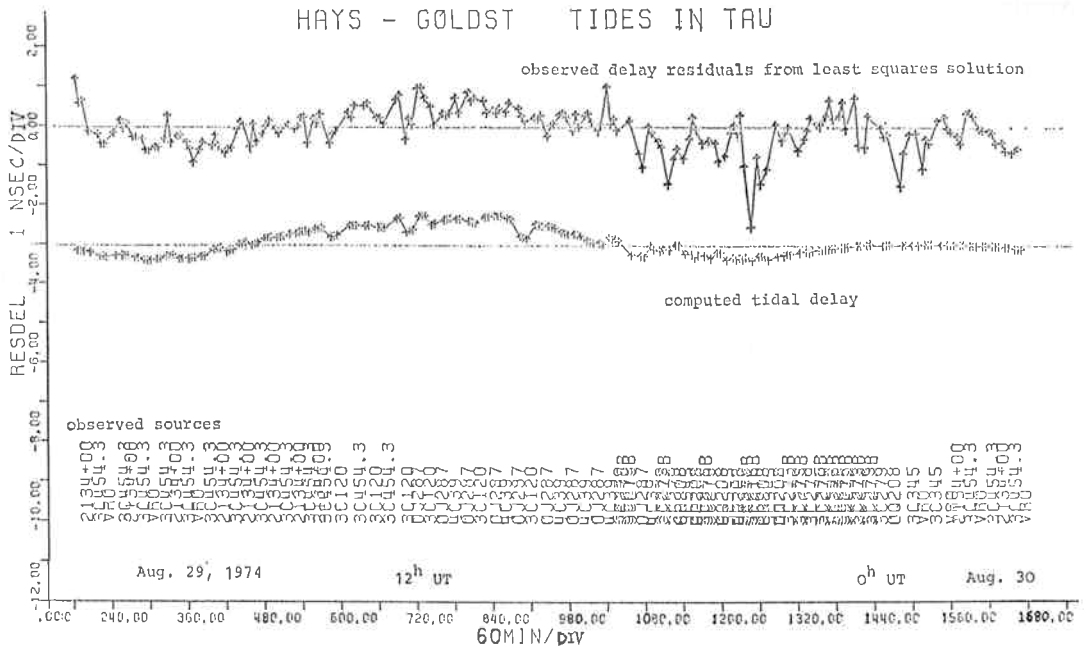
3. 地球潮汐の影響

測地学や位置天文学への応用を志す際に、大気補正とともに忘れてはならないものに地球潮汐の影響がある。同じ潮汐でも、海水の干満現象はなじみ深いのが、地球地殻の潮汐は、予測されてはいたが、測定方法は難しく、伸縮計 (extensometer) による測定を除けば、すべて間接的である。VLBI 観測により、地球上遠く離れた2地点を結ぶベクトルの長さや方向がわかるが、地球潮汐測定という点ではこれも間接的である。しかし、VLBI 観測を1〜数日にわたって実行することにより観測精度が十分に上り、2地点を結ぶベクトルの変化が検出される。このことが、VLBI の観測資料が、地球潮汐の解析に役立つゆえんである。

さて、本特集号 I-1. の4-3. でも触れたが、1977年9月に西ドイツの首都ボンで開催された、第8回国際地球潮汐会議において、VLBI 観測による地球潮汐の検出の可能性⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ について報告があり、検出結果の1例が示された。今後の測地目的等の補正に役立つと思うので紹介する。

VLBI によって地球潮汐を検出するための実験は、最初二つの基線について試みられた。一つは、ボンの Effelsberg 電波望遠鏡と Owens Valley の Big Pine 電波望遠鏡を結ぶほぼ、東西に延びる 8200km の基線であり、他は、Effelsberg 電波望遠鏡と、NASA Deep-Space-Network 用のヨハネスブルグのアンテナとを結ぶほぼ、南北に延びる 8040 km の基線であった。上述の二つの基線において、遅延時間 $\tau(t)$ 及びその変化率 $d\tau(t)/dt$ に現れる地球潮汐の影響の予想値は、それぞれ、約 1~2 n sec 及び 0.1 psec/sec であった。しかし、実際に 1973 年 (南北基線)、1976 年 (東西基線) について行われた実験では、これらの潮汐の影響よりもノイズの方が、約 10 倍 (τ について) 及び約 100 倍 ($d\tau/dt$ について) も大きかったので、地球潮汐の影響検出は不可能であった。

一方、1974年にMITの Shapiro ら⁽¹⁴⁾ が行った、Haystack-Goldstone 間 3900km の VLBI 実験がある。この実験では、測地用に威力を発揮しているマーク I システム (1チャンネル 360 kHz 以下で多チャンネルバンド幅合成法使用) と、周波数安定度 10^{-13} の水素メーザが用いられた。数回の実験のうち地球潮汐検出の可能性のあるものがあつたので、そのデータを用いて最近ボンで再計算が試みられた。第6図に最小自乗法で得られ



第6図 Haystack-Goldstone 基線 VLBI 視測による地球潮汐の検出。縦軸は遅延時間の残差，横軸は視測時間と観測に用いた電波源。

た delay residual と理論的な tidal delay 曲線との対比を示す。実験におけるノイズの平均2乗誤差は ± 0.3 n sec であり，潮汐の振幅は約 1 n sec である。これら二つのカーブの一致は，地球潮汐の検出が，現実のものとなりつつあることを示している。ただ，遅延時間の変化率の方は，潮汐の方の効果が約 0.07 psec/sec であるのに対し，ノイズの方が ± 0.22 p sec/sec とかなり大きく，あまり期待できない。この遅延時間の変化率には大気の影響が大きいと見られ，精度を上げるのは容易ではない。

このように，地球潮汐の影響をとり出すにも，結局は大気の影響を知る必要がある。ほかに，用いる原子標準及びシステム機器の安定性，アンテナ構造の安定性等も考えられる。これらを含めて近い将来，水素メーザを用いたマークⅢクラスのシステムで，遅延時間の誤差 0.1 n sec (光路差 3 cm 相当) が実現しよう。

参 考 文 献

(1) Wesseling, K.H., Basart, J.P. and Nance, J.L.; "Simultaneous interferometer phase and water vapor measurements", Radio Science, 9, No. 3, pp. 349-353, March, 1974.
 (2) Schaper, L.W., Staelin, D.H. and Waters, J.W.; "The Estimation of Tropospheric Electrical Path

Length by Microwave Radiometry", Proc. IEEE, 50, pp. 272-273, Feb. 1970.

(3) CCIR Rept. 233.; "Influence of the non-ionized atmosphere on wave propagation", Conclusions of the interim meeting of SG-5, p. 69 (1976).
 (4) Westwater, E.R.; "An analysis of the correction of range errors due to atmospheric refraction by microwave radiometer techniques", Inst. for Telecommun. Sci. and Aeronomy, Boulder, Colo., ESSA Tech. Rept. IER 30-ITSA-30, March 1967.
 (5) Bean, B.R. and Dutton, E.J.; "Radio Meteorology", NBS Monograph 92, March 1966.
 (6) Mathur, N.C., Grossi, M. D. and Pearlman, M.R.; "Atmospheric effects in very long baseline interferferometry", Radio Science, 5, No. 10, pp. 1253-1261, Oct. 1970.
 (7) Baars, J.W.M.; "Meteorological Influences on Radio Interferometer Phase Fluctuations", IEEE Trans. A-P, 15, No. pp. 582-584, July. 1967.
 (8) Basart, J.P., Miley, G.K. and Clark, B.G.; "Phase Measurements with an Interferometer Baseline of 11.3 km", IEEE Tran., AP-18, No. 3. pp. 375-379, May. 1970.
 (9) Deam, A.P. and Fannin, B.M.; "Phase-Difference Variations in 9,350 Megacycle Radio Signals

- Arriving at Spaced Antennas", Proc. IRE, 43, pp. 1402—1404, Oct. 1955.
- (10) Weisbrod, S. and Anderson, L.J.; "Simple Methods for Computing Tropospheric and Ionospheric Refractive Effects on Radio Waves", Proc. IRE, 47, pp. 1770—1777, Oct. 1959.
- (11) Herbstreit, J.W. and Thompson, M.C.; "Measurements of the Phase of Radio Waves Received over Transmission Paths with Electrical Lengths Varying as a Result of Atmospheric Turbulence", Proc. IRE, 43, pp. 1391—1401, Oct. 1955.
- (12) Bonatz, M. and Cambell, J.; "Potential of VLBI-technique for direct measurement of Earth tides", presented at the 8th International Symposium on Earth Tides, 19—24, Sep. at Bonn, 1977.
- (13) 中川一郎 "第8回国際地球潮汐会議" 位置天文学研究会における報告, Jan. 26, 1978, 於海上保安庁水路部.
- (14) Shapiro, I.I., Robertson, D.S., Knight, C.A., Counselman III, C.C., Rogers, A.E.E., Hinteregger, H. F., Lippincott, S., Whitney, A.R., Clark, T.A., Niell, A.E. and Spitzmesser, D.J.; "Transcontinental Baselines and the Rotation of the Earth Measured by Radio Interferometry", Science, 86, pp. 920—922, 6, Dec. 1974.

