

資料

### 9. VLBI に及ぼす伝搬路の影響

中村 健治\*

(昭和 54 年 9 月 22 日受理)

#### 1. ま え が き

VLBI では相関をとるべき電波を受信する 2 アンテナは通常数 10 km 以上離れていると考えられ、電波伝搬路の状態は同様のものとはいいいにくい。伝搬路の影響は地球上での VLBI の精度にとって最終的な限界になるといわれている<sup>(1)</sup>。ここでは電離圏、対流圏中の伝搬路がいわゆる excess path に与える影響、及びその補正方法について述べる。

#### 2. 電離圏の影響

excess path  $P$  は大気屈折率を  $n$  とすれば、

$$P = \int (n-1) ds, \quad \dots\dots(1)$$

伝搬路

と表される。電離層のような電離した媒質の複素屈折率はアップルトンの公式により与えられる<sup>(2)</sup>。これによれば複素屈折率  $n$  は

$$n^2 - 1 = \frac{-X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2}} \quad \dots\dots(2)$$

$$X = \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2}, \quad Y_L = \frac{eBL}{m\omega}, \quad Y_T = \frac{eBT}{m\omega}, \quad Z = \frac{\nu}{\omega},$$

と表される。ここで

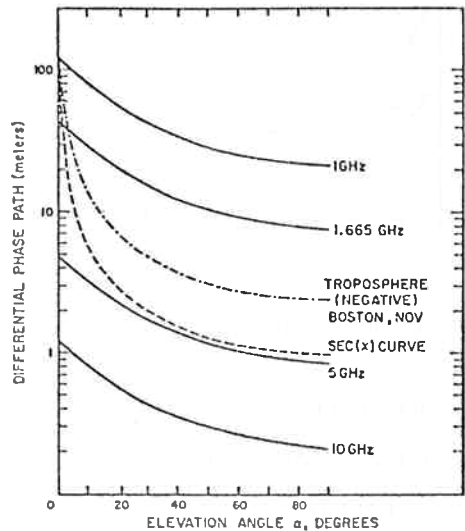
- $N_e$ : 電子密度
- $e$ : 電子の電荷
- $m$ : 電子の質量
- $\omega$ : 角周波数
- $BL$ : 位相伝搬方向に平行な磁場成分
- $BT$ : 位相伝搬方向に直角な磁場成分
- $\nu$ : 電子衝突回数

である。

電離層上層では衝突回数が少ないことから  $Z=0$  として  $\omega^{-1} = (2\pi f)^{-1}$  で展開すると

$$n = 1 - K_1 \frac{N_e}{f^2} \pm K_2 \frac{N_e B \cos \theta}{f^3} + 0[f^{-4}], \quad \dots\dots(3)$$

となる。ここで  $K_1, K_2$  は定数である。GHz 帯以上の



第1図 アルファチャプマン層を仮定した電離層による excess path (differential phase path ともいう。以下同様)

高周波では電離層の影響は小さいので  $f^{-3}$  以下の項は無視できると考えると

$$n = 1 - K_1 \frac{N_e}{f^2} \quad \dots\dots(4)$$

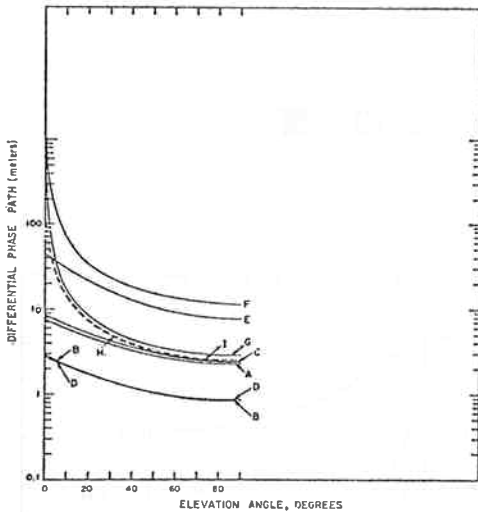
となり、excess path  $P$  は

$$P \approx \frac{K_1}{f^2} \int N_e ds \quad \dots\dots(5)$$

となる<sup>(3)</sup>。第1図は電子密度として  $\alpha$ -Chapman プロファイルを仮定したときの各周波数での excess path を仰角の関数として表したもので、第2図は第3図に示したような、実際に観測されたプロファイルに基づいて計算された excess path である<sup>(3),(4)</sup>。周波数 1.665 GHz, 5 GHz, 10 GHz では仰角 20 度でそれぞれ 30 m, 2 m, 50 cm 程度の excess path のあることがわかる。

この電離層の全電子による excess path を見積り補正する方法としては、地上及び電離層観測衛星によるボトムサイド、トップサウンディングによる電子密度のプロファイルの測定を利用したり、excess path が周波数に依存していることを利用する方法が考えられる。2 周波を用いる場合、2 局でのそれぞれの周波数に対する

\* 鹿島支所 第一宇宙通信研究室

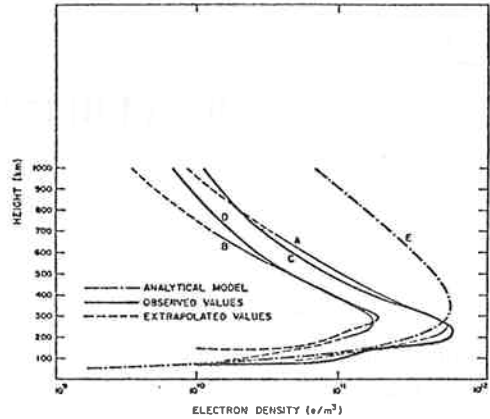


第2図 種々の電子密度プロファイルに基づいて計算された excess path

- A: Millstone Hill の IS レーダによる 1963 年 12 月の 1500 ETS (米国東部標準時) の電子密度プロファイルから計算された excess path
- B: 同 1800 EST の電子密度プロファイルから計算された excess path
- C: 人工衛星 Allouette 1 及びカナダのオタワにおけるイオノゾンダによる 1962 年 10 月 18 日 0851 EST の電子密度プロファイルから計算された excess path
- D: 同 1963 年 10 月 31 日 1800 EST の電子密度プロファイルから計算された excess path
- E: アルファチャプマン層を仮定したときの電子密度プロファイルから計算された excess path

excess path の差を  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ , 求めたい excess path の差を  $\Delta P_0$  とすれば

$$\Delta P_1 = \frac{K_1}{f_1^2} \int \Delta N_e ds + \Delta P_0 \quad \dots\dots(6)$$



第3図 種々の観測による電子密度プロファイル (図中の記号A~Eは第2図のA~Eに対応している)

$$\Delta P_2 = \frac{K_1}{f_2^2} \int \Delta N_e ds + \Delta P_0 \quad \dots\dots(7)$$

より,

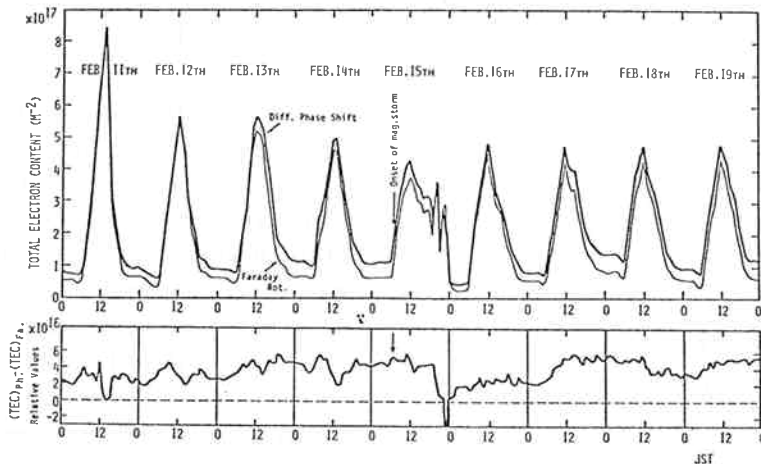
$$\Delta P_0 = \frac{f_1^2 \Delta P_1 - f_2^2 \Delta P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad \dots\dots(8)$$

と  $\Delta P_0$  が求まる。考え方としては、高い方の周波数での測定を基本として、低い方の周波数での測定との差は全電子数によるものと考えて、この差から高い方の周波数での測定を補正するというのである。

このほか、ETS-II 衛星のような数波のコヒーレントなビーコン波を出している衛星を用いて2周波数の位相差から全電子数を求め補正を行うのも上記と同様ではあるが一つの方法であろう。また、Faraday 回転  $\Omega$  は

$$\Omega = \frac{Q}{f^2} \int N_e B L ds \quad \dots\dots(9)$$

Q: 定数



第4図 ETS-II 衛星の 136 MHz テレメトリ波の Faraday 回転と、1.7 GHz 及び 11.5 GHz のビーコン波の位相差の2方法による全電子数の測定とその差

と表され<sup>(2)</sup>全電子数と関係しているので利用することができよう。第4図に ETS-II の 1.7 GHz と 11.5 GHz のビーコン波の位相差より求めた全電子と、136 MHz テレメトリ波の Faraday 回転より求めた全電子数を示す<sup>(5)</sup>。地球磁場としては高度 400 km 付近のものを代表値として用いている。なお、本観測では絶対量は測定できていないので、両者の相対的な変化が合うようにオフセットをかけている。両者の変化量は 5% 程度の差で良く合っており、excess path に換算して 10 GHz で 2.5 cm 以下の補正ができそうである。両者の多少のズレは、Faraday 回転が電波の伝搬方向と地球磁場との傾きに依存しており、地球磁場の非一様性の影響が現れたものと考えられ、Faraday 回転による全電子数測定の一つの欠点になっている。

このように衛星を使った間接的測定の場合には、VLBI で実際に受けている電波の伝搬路に沿った全電子数とは必ずしも一致しない。例えば角度にして 45 度も異なっておれば電子密度のピークの高度 300 km 付近では数百 km も離れてしまい、電離層の細かい変動の補正はできないと考えられる。このため VLBI システムそのもので 2 周波を用いて直接に測定する方法が最も良いと思われる。

### 3. 対流圏の影響

対流圏において excess path に大きな影響を与える要因に水蒸気がある。温度等による影響も大きい水蒸気はその変動幅が大きいため特に重要である。

空気の屈折率を考えるためにまず分子による分極率を考える。分極  $D$  は次のように表される<sup>(6)</sup>。

$$D(\omega) = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N_A}{3} \left[ \alpha_0 + \frac{\mu^2}{3kT} \frac{1}{1 + i\omega\tau} \right] \quad \dots\dots(10)$$

ここで

- $\epsilon$ : 分極率
- $M$ : 分子量
- $\rho$ : 密度
- $N_A$ : アヴォガドロ数
- $\alpha_0$ : 分子自身の分極率
- $\mu$ : 永久双極子モーメント
- $k$ : ボルツマン定数
- $T$ : 絶対温度
- $\omega$ : 考えている電波の角周波数
- $\tau$ : 分子の配向の緩和時間

である。上式のかっこ中の第1項は分子そのものの分極率の寄与、第2項は永久双極子が外場により方向がそろうことによる寄与を表している。分子の配向は外場によってそろおうとする一方、熱運動によってバラバラにな

第1表 湿度 60% の ICAO (International Civil Aviation Organization) 標準大気について、 $\Delta N = a\Delta T + b\Delta e + c\Delta p$  と表したときの各係数の値

高度 km	$N$	$T$ °C	$p$ mb	$e$ mb	$a$ $k^{-1}$	$b$ $md^{-1}$	$c$ $mb^{-1}$
0	319	15.0	1013	10.2	-1.27	4.50	0.27
1	277	8.2	893	6.5	-1.09	4.72	0.28
3	216	-4.5	701	2.6	-0.86	5.17	0.29
10	92	-50.3	262	0.04	-0.50	7.52	0.30
20	20	-56.5	55	0	-0.09	7.96	0.35
50	0.2	9.5	0.8	0	-0.0008	4.67	0.27

第2表 温度、水蒸気、大気圧の変動による屈折率及び excess path の変動幅

	$\Delta T$ (K)	$\Delta e$ (mb)	$\Delta p$ (mb)	$\Delta T$	$\Delta e$	$\Delta p$
	10	10	10	3	3	3
$\Delta N$ (地表)	13	45	3	4	14	1
excess path (cm)	10	18	2	3	6	1

ろうとするために温度への依存性が現れる。 $\tau$  は外場の変動に対して分子の配向の反応する速さを示しており温度依存性を持つが 100 GHz 以下では無視できて

$$D(\omega) = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} \left( \alpha_0 + \frac{\mu^2}{3kT} \right), \dots\dots(11)$$

となる。

水蒸気、酸素等の気体の場合は、水蒸気では 22.2 GHz、酸素では 60 GHz で吸収線がありそれらに付随する分散があるが 30 GHz 以下では重要ではない<sup>(6)</sup>。

気体では  $\epsilon \sim 1$  であること、 $M/\rho \propto T/p$  ( $p$  は圧力)であることを考慮すると

$$\epsilon - 1 = K \frac{p}{T} \left( A + \frac{B}{T} \right), \quad \dots\dots(12)$$

$K$  は定数

となる。地球大気では乾燥空気は無極性と考えるとよいこと、有極性分子は事実上水蒸気のみであること、気体の透磁率はほぼ 1 であること等、から最終的に大気の屈折率に關係した  $N$  値<sup>(6)</sup> は水蒸気の分圧を  $e$ 、圧力の単位を mb にとって

$$N = (n-1) \times 10^6 = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad \dots\dots(13)$$

となる。excess path は上式と(1)式より求める。

上式に地表での代表的な値として  $e=10$  mb,  $p=1000$  mb,  $T=300$  K を代入すると  $N$  としては 300 程度、大気の代表的厚さとして 8 km をとれば鉛直上方での

第3表 天頂方向の大気による excess path 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 24 GHz 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

excess path として 2~3 m という値が得られる。この excess path のうち水蒸気による寄与は 40 cm 程度であり、乾燥空気による寄与が大部分を占めている。しかし、VLBI では 2 局での伝搬路長差のみが重要なので絶対値の大きさよりもその変動幅が重要である。そこで上式を  $T, e, p$  で展開して

$$\Delta N = a\Delta T + b\Delta e + c\Delta p, \quad \dots(14)$$

とすると、 $a, b, c$  の値は第 1 表のようになる。温度、水蒸気圧、大気圧の変動幅として代表値 10 度、10 mb、10 mb をとり大気の厚みを 8 km、水蒸気についての厚みを 4 km とするとそれぞれによる寄与は第 2 表のようになる。また、地上で温度等の観測を行ったとしてその場合の推定誤差としてそれぞれ 3 度、3 mb、3 mb としたときのそれぞれの  $\Delta N$  への寄与も第 2 表に示した。この表から excess path の変動分としては水蒸気の影響が最も大きく温度の寄与はそれより小さく圧力変動の影響は前二者に比較すると無視できるといえる。なお、乾燥空気による寄与は全分子数のみによっており、温度への依存性は全分子数を通して間接的に効いている。一方、全分子数は地表で大気圧を測定すれば求まるので乾燥空気については地表の大気圧を測定することによりほとんど完全に補正することができると考えられる。その

ときには温度の影響は水蒸気を通してのみとなり、第 2 表の値の 3 分の 1 程度になる。

以上のように水蒸気の変動による影響が最も大きいので水蒸気量を測定することが重要な課題となる。水蒸気は 22.2 GHz に rotational バンドの吸収帯を持つので、この吸収帯に伴う熱放射をラジオメータを用いて測定すれば水蒸気量に関する有効な情報が得られる。また 60 GHz 帯のラジオメータを用いて酸素の熱放射も測定すれば更に情報は豊富となろう。こうしたことから夏と冬それぞれ 50 個のラジオゾンデの観測値を用いて excess path を計算し、一方で推定 excess path  $P^*$  として地上温度、ラジオメータによる天気雑音温度等により線型に

$$P^* = \sum_i a_i d_i \quad \dots(15)$$

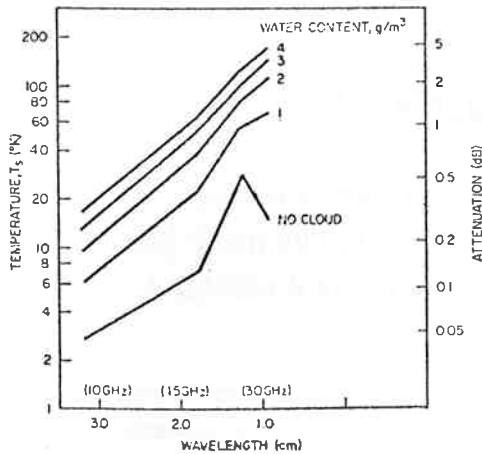
$d_i$ : 各観測量

と表して平均 2 乗の意味で最も良い係数  $a_i$  を求めるという方法で推定を行った報告があり結果は第 3 表のようになる<sup>(7)</sup>。この表は地上気象情報を用いれば 3 cm 以下、ラジオメータも用いれば 1 cm 以下の精度が可能であることを示している。この結果はそれぞれの係数の妥当性、観測量の独立性、サンプルの地域性等の問題点はあるが一つの目安にはなる。

対流圏では水蒸気、酸素等の気体分子以外にも雲や雨等の影響も考えられる。雲や雨等の水滴による位相のズレは水滴の形状を仮定し散乱波を Rayleigh あるいは Mie theory 等によって求めることにより得られる。第 4 表に屈折率に換算した雨の影響を示す<sup>(8)</sup>。この表から雨域中の伝搬路長を代表的な値として 5 km とすると 25 mm/h の強い雨でも excess path は 1 cm 程度にしかならないことがわかる。また、雲の影響も 0.5 cm 以下と考えられる。このように、雨や雲は excess path にはほとんど影響を与えないが吸収に対しては GHz 帯以上では効いてきて、天空雑音温度に第 5 図に示すように

第4表 降雨による屈折率  $n$  の変動 (表中の値は  $n-1$  を示す)

周波数 (GHz)	降雨強度 (mm/h)	1.25	2.5	5.0	12.5	25
1.43		$0.1 \times 10^{-6}$	$0.2 \times 10^{-6}$	$0.4 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$
3		$0.1 \times 10^{-6}$	"	"	"	"
6		$0.1 \times 10^{-6}$	$0.3 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-6}$
16		$0.1 \times 10^{-6}$	$0.3 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$
30		$0.1 \times 10^{-6}$	$0.2 \times 10^{-6}$	$0.4 \times 10^{-6}$	$0.8 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-6}$



第5図 降雨による天空雑音温度の増加

影響を与える<sup>(9)</sup>。このことは水蒸気量を測定するためにラジオメータを使用することを考えると障害となってくる。しかし、これについても雲の吸収係数は40 GHz以下では $f^2$ に反比例すること<sup>(10)</sup>を利用して2周波ラジオメータを用いれば地上観測のみで雲の影響は除くことができるという報告もある<sup>(1)</sup>。この報告では周波数を適当に選ぶことにより現実温度、湿度プロファイルの変化にも比較的左右されない測定ができ、1 cm以下の精度で excess path が求まるとされている。この適当な2周波の対として Wu<sup>(1)</sup>は 20.0/26.5 GHz, 20.3/31.4 GHz, 24.5/31.4 GHz の三つを挙げている。

#### 4. あとがき

excess path に与える対流圏及び電離圏の影響及びその補正法について述べた。適当な手法を用いれば2~3 cm以下の精度で補正を行うことが可能と考えられる。

excess path を求めるためには、電離圏では全電子数を求めることが、対流圏では水蒸気量を求めることが重要である。このような量の測定は、より広く大気環境のモニターの一環としてみることができよう。このような意味からも VLBI 計画の将来が楽しみである。

最後に、本発表の機会を与えていただいた川尻鹿島支所第三宇宙通信研究室長、高橋研究官、林衛星通信部第一衛星通信研究室長、生島鹿島支所長に感謝いたします。また、有益な助言、資料を提供していただいた鹿島

支所第一宇宙通信研究室藤田研究官、阿波加枝官に感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) Wu, S.-C.; "Optimum Frequencies of a Passive Microwave Radiometer for Tropospheric Path-Length Correction", IEEE Trans., AP-27, No. 2, pp. 233-239, 1979.
- (2) Davies, K.; "Ionospheric Radio Propagation", NBS Monog. 80, 1965.
- (3) Mathur, N. C., Grossi, M. D. and Pearlman, M. R.; "Atmospheric Effects in Very Long Baseline Interferometry", Radio Sci., 5, No. 5, pp. 1253-1261, 1970.
- (4) 川尻轟大; "大気、電離層、地球潮汐の補正", 電波研季報, 24, No. 130, pp. 558-564, 1978.
- (5) Sinno, K., Ogawa, T., Kan, M., Koizumi, T., Fujita, M. and Awaka, J.; "Ionospheric and Plasmaspheric Disturbances Obtained by ETS-II Measurement during a Magnetic Storm on February 15, 1978", Sol. Terr. Env. Res. Japan, 3, pp. 138-145, 1979.
- (6) Bean, B. R. and Dutton, E. J.; "Radio Meteorology", NBS Monog. 92, pp. 435, 1966.
- (7) Schaper Jr., 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, 1970.
- (8) Setzer, D. E.; "Computed Transmission through Rain at Microwave and Visible Frequencies", B. S. T. J., 49, pp. 1873-1892, 1970.
- (9) 乙津祐一; "16 GHz 帯及び 35 GHz 帯における天空雑音の測定", 電波研季報, 16, No. 85, pp. 379-394, 1970.
- (10) Staelin, D. H.; "Measurements and Interpretation of the Microwave Spectrum of the Terrestrial Atmosphere near 1-centimeter Wavelength", J. G. R., 71, No. 12, pp. 2875-2881, 1966.

