

VLBIの基礎

NICT 光時空標準グループ 鹿島宇宙技術センター
関戸 衛

2008 年 4 月 7 日

1 電波望遠鏡の観測量

電波天文学で使用する、電波強度をあらわす諸量の定義について最初に説明する(参考文献「宇宙電波天文学」[1])。

1.1 定義

1.1.1 プランクの黒体放射の式と強度(Intensity)(I_ν)

黒体放射は電波天文学にとってきわめて重要である。星間空間の電離ガス雲や星の熱放射などは黒体近似が成立するのをはじめ、熱的・非熱的電波を問わず、電波源の強度を黒体放射の強度に置き換えることで電波強度の表示として使っているからである。熱平衡状態にある黒体に囲まれた領域の、単位体積、単位周波数あたりのエネルギー密度はプランクの黒体放射の式

$$u_\nu(T)d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{\exp\{h\nu/k_B T\} - 1} d\nu \quad [\text{J/m}^3] \quad (1)$$

で与えられる。 ν は周波数 (Hz), c は真空中の光速¹、 h はプランク定数²、 k_B はボルツマン定数³、 T は絶対温度 (K) である。その領域から単位時間、単位立体角あたりに放射されるエネルギーは

$$I_\nu(T)d\nu = \frac{c}{4\pi} u_\nu(T) d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\{h\nu/k_B T\} - 1} d\nu \quad [\text{J/sec m}^3 \text{ sr}]$$

である。この式を使って、電波強度 $I_\nu(T)$ を各温度に対して、周波数の関数としてプロットしたものを図 1 に示す。

$h\nu \ll k_B T$ 電波の周波数が低く、温度が高いときには

$$\begin{aligned} I_\nu(T)d\nu &\simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{k_B T}{h\nu} d\nu \\ &= 2 \frac{\nu^2}{c^2} k_B T d\nu = \frac{2k_B}{\lambda^2} T d\nu \end{aligned} \quad (2)$$

と近似され、レイリージーンズの法則を与える。図 1 の左側の直線状の部分に相当し、電波天文学では数十 K の極低温の領域と、ミリ波以上の周波数領域を除いて、ほとんどこの領域を扱う。

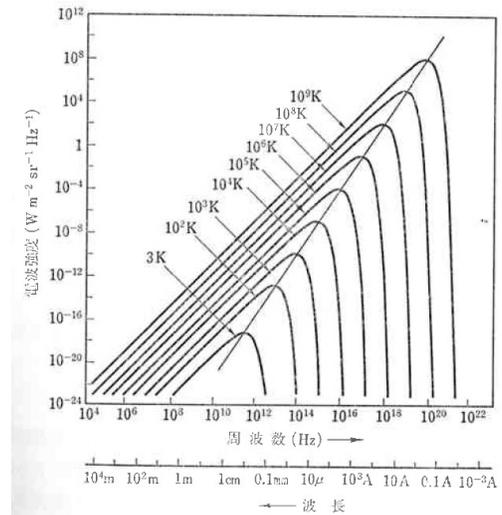


図 1: 熱放射(プランク放射)の強度スペクトル

¹ $c=2.9979246 \times 10^8$ m/sec

² $h=6.6261 \times 10^{-34}$ J sec

³ $k_B = 1.3807 \times 10^{-23}$ J/K

$h\nu \gg k_B T$ 非常な高周波または極低温の場合には

$$I_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp\left\{-\frac{h\nu}{k_B T}\right\} \quad (3)$$

と近似できて、ウィーンの方法を与える。放射強度は周波数 ν の増大につれて急激に低下する。

1.1.2 フラックス密度 (S_ν)

単位時間、単位面積、単位周波数あたりのエネルギーを フラックス密度 といい

$$S_\nu = \int \int_{\text{電波源}} I_\nu(\theta, \phi) d\Omega \quad [\text{W/ Hz m}^2] \quad (4)$$

で定義する。電波源の強度を黒体の温度であらわし、輝度温度 (Brightness Temperature) T_B を式 (2) から

$$I_\nu = \frac{2k}{\lambda^2} T_B \quad (5)$$

で定義する。フラックス密度は、電波源の立体角の大きさについて積分し、輝度温度が一様であると近似すると

$$S_\nu = \frac{2k_B}{\lambda^2} \int \int_{\text{電波源}} T_B d\Omega = \frac{2k_B}{\lambda^2} \Omega_{\text{電波源}} \quad (6)$$

メインビームの方向のゲインを $P(0,0)=1$ と規格化したビームパターンを用いて、有効開口面積 A_e に集められる電波のエネルギーは、

$$W_\nu d\nu = \frac{1}{2} A_e d\nu \int \int_{\text{電波源}} I_\nu(\theta, \phi) P_\nu(\theta, \phi) d\Omega \quad [\text{W/Hz}] \quad (7)$$

となる。1/2 は受信機が一度に片偏波しか受信できないために、2つの自由度のうちひとつを失っているため起こる。アンテナが、一様な黒体放射に包まれているとき、式 (5) (7) から

$$W_\nu = \frac{k_B T_B}{\lambda^2} A_e \int \int_{4\pi} P_\nu(\theta, \phi) d\Omega \quad (8)$$

アンテナは放射と平衡状態にあるので $W_\nu = k_B T_B$ である。従って、有効開口面積 A_e とアンテナのビームとの関係が得られる。

$$A_e = \frac{\lambda^2}{\int \int_{4\pi} P_\nu(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{\lambda^2}{\Omega_A}, \quad (9)$$

Ω_A はアンテナのビームの全立体角である。電波源の広がり、メインビーム幅に比べて十分小さいとき、 $P_\nu(\theta, \phi) \simeq P(0,0) = 1$ とみなせて、

$$W_\nu d\nu = \frac{1}{2} A_e S_\nu \quad (10)$$

1.1.3 アンテナ温度 (T_a)

アンテナで受信される電力を温度スケールで表すため、アンテナ温度 T_a を、

$$W_\nu = k_B T_a$$

で定義する。式 (10) と等しいと置いて、フラックス密度の電波源を有効開口面積 A_e のアンテナで受信したときのアンテナ温度は

$$T_a = \frac{1}{2k_B} A_e S_\nu \quad [\text{K}] \quad (11)$$

で表される。輝度温度との関係は、(9) 式を使って

$$\begin{aligned}
 T_a &= \frac{1}{2k_B} A_e \int \int_{\text{電波源}} I_\nu(\theta, \phi) P_\nu(\theta, \phi) d\Omega = \frac{\int \int_{\text{電波源}} T_B(\theta, \phi) P_\nu(\theta, \phi) d\Omega}{\int \int_{4\pi} P_\nu(\theta, \phi) d\Omega} \\
 &= T_B \frac{\Omega_{\text{電波源}}}{\Omega_A}
 \end{aligned} \tag{12}$$

電波源に対しビームの大きさが小さいほど、輝度温度を上限として、高いアンテナ温度で受信できる。

1.1.4 大気雑音温度、吸収

ある系の単位体積中で単位時間あたり、単立体角に放出される単位周波数あたりのエネルギー密度を放射係数と呼び ε_ν とする。電磁波を放出する系は必ず、同じ周波数の電磁波を吸収することができる(キルヒホッフの法則)。吸収係数 κ_ν を系に入射した強度 I_ν の電磁波が単位長さを通過したときに $\kappa_\nu I_\nu$ だけ強度を失うとして定義する。

$$dI_\nu = -\kappa_\nu I_\nu dx$$

ガス雲中を x 方向に伝わる平面波を考えると、放射の伝搬方程式は

$$dI_\nu = \varepsilon_\nu dx - I_\nu \kappa_\nu dx \tag{13}$$

$\kappa_\nu dx \equiv d\tau_\nu$ とおき、 $\frac{\varepsilon_\nu}{\kappa_\nu} \equiv S_\nu$ とおくと

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \frac{\varepsilon_\nu}{\kappa_\nu} - I_\nu = S_\nu - I_\nu \tag{14}$$

この線形微分方程式の一般解は

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0) \exp\{-\tau_\nu\} + S_\nu(1 - \exp\{-\tau_\nu\}) \tag{15}$$

$I_\nu(0)$ は系の背後から x 方向に入射する電磁波強度で、右辺第 1 項は系の物質により吸収される背景放射、第 2 項は系自身の放出する放射を表す。 τ_ν は光学的厚さと呼び、光学的厚さが厚い場合と、薄い場合それぞれの近似式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 \tau_\nu \gg 1 (\text{光学的に厚い}) \text{ 場合} & : I_\nu(\tau_\nu) = S_\nu \\
 \tau_\nu \ll 1 (\text{光学的に薄い}) \text{ 場合} & : I_\nu(\tau_\nu) = (1 - \tau_\nu)I_\nu(0) + \tau_\nu S_\nu
 \end{aligned}$$

マイクロ波の電波を実際の大気を通して観測する場合、光学的厚さが薄い近似が成立ち、(5) 式から、強度 I_ν を輝度温度で表して、輝度温度 T_{star} の星の電波が、温度 T_{atm} の大気を通して観測されるとき、 $\Omega_{\text{電波源}}/\Omega_A = 1$ と簡単化して考えると、アンテナ温度は

$$T_a = (1 - \tau_\nu)T_* + \tau_\nu T_{\text{atm}}. \tag{16}$$

実際に鹿島 34m アンテナを使った 8GHz 帯の観測では、電波星のアンテナ温度は明るいもので数十～数百 K に対し、大気温度 $T_{\text{atm}} \sim 200$ K、 $\tau_\nu \leq 0.06$ 程度で無視できない寄与がある。

1.1.5 システム雑音温度 (T_{sys})

大気の雑音の他に、大きな雑音の原因のひとつは受信機の雑音 (T_{rx}) である。これら受信システムの雑音を システム雑音温度 T_{sys} と呼び

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{rx}} + T_{\text{atm}} \quad (17)$$

と書く。大気の雑音温度は、天頂方向の大気の光学的厚さを τ_ν^0 として $\tau_\nu = \tau_\nu^0 / \sin(EL)$ のように、仰角の関数として近似され、HOT.COLD などの校正器が使えれば、異なる仰角の Y ファクタ法などの測定により、受信機雑音温度 T_{rx} と大気の温度、光学的厚さ $T_{\text{atm}}\tau_\nu$ を分離推定できる。ここでは詳しい説明は省略する。

1.2 観測量

位置天文学、測地学などで使う VLBI の観測量は、電波源からの信号がふたつのアンテナに到達する時間の差 (遅延量) である。遅延量には群遅延と位相遅延があるが、VLBI で主に使用するのは群遅延量である。観測量となる群遅延量は、測定したい幾何学的遅延量の他に、大気、電離層の伝搬遅延量、両観測局の原子時計の同期誤差、装置に起因する遅延が必ず含まれる。

$$\tau_{\text{obs}} = \tau_{\text{geo}} + \tau_{\text{atm}} + \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{clk}} + \tau_{\text{ins}} + \tau_{\text{str}} \quad (18)$$

τ_{str} は電波源の構造に起因する遅延である。

1.2.1 群遅延量と位相遅延量

z 軸方向に伝搬する波数 k , 角周波数 ω の電磁波 $s(t, z) = E_0 \exp\{j(kz - \omega t)\}$ を考えるとき群速度は $v_g \equiv \frac{\partial \omega}{\partial k}$ で定義され、媒質に周波数分散性がない場合には、位相速度 $v_p \equiv \frac{\omega}{k}$ と同じになる。群速度 v_g で伝搬する信号の到達に要する時間を群遅延量とよび、位相速度で伝搬する波の到達時間差 (位相遅延) と区別する。群遅延量は、ある周波数帯域を持った信号が、伝搬したときに周波数に比例した位相勾配を生じさせる。一般にある波形 $f(t)$ を τ だけ並進した波形をフーリエ変換により周波数領域で見ると

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega(t+\tau)} dt = F(\omega) e^{-j\omega\tau} \quad (19)$$

と周波数に比例した位相項 $e^{-j\omega\tau}$ がかかっていることからわかる。ただし、 $F(\omega)$ は $f(t)$ のフーリエ変換である。ある周波数 ω 成分の平面波が Δz 進んだときの位相差 $\Delta\phi = k\Delta z$ の周波数に関する微分係数 $\frac{\partial \phi}{\partial \omega} = z / \left(\frac{\partial \omega}{\partial k}\right) = z / v_g \equiv \tau_g$ が群遅延であり、原点 ($f=0$) からの傾き $\Delta\phi / \omega = \Delta z / \left(\frac{\omega}{k}\right) = \Delta z / v_p \equiv \tau_p$ が位相遅延量である。

測地 VLBI では主に群遅延量を用いるが、GPS や電波天文的な VLBI の解析では位相遅延量も用いられている。

1.2.2 乾燥大気の遅延量 (参考文献「Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy[2]」)

大気中を伝搬する電波は真空に比べて速度が遅い (屈折率が 1 より大きい) ため地上の電波望遠鏡で宇宙からの電波を受信すると、空気がない場合に比べて遅延が生じる。地上から約 11km, $T=218\text{K}(-60^\circ\text{C})$ 程度まで気温は単調に -6.5K/km で減少し、この最下層の大気を Troposphere (対流圏) と呼ぶ。電波の伝搬式を $\vec{E}(\omega, t) = \vec{E}_0 \exp\{j(n^* \vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t)\}$ とするとき、 $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ は波数ベクトル、 λ は真空中の波長、 n^* は複素屈折

率で $n^* = n_r + jn_i$ であり、虚数部は、減衰に関係しており、減衰定数 $\alpha = \frac{2\omega}{c}n_i$ で定義される。大気中の伝搬定数 (波数) は

$$n_r|\vec{k}| = \frac{\omega n_r}{c} = \frac{\omega}{v_p}, \quad v_p = \frac{c}{n} < c$$

大気中の伝搬による遅延を長さに変換した量を Excess Path Length ($\Delta l = c\Delta t$) といい、大気の屈折による光路変化分 (1mm 以下) を無視して

$$L = \int (n - 1)dz = 10^{-6} \int N(z)dz$$

ここで、 $N(z) = 10^6(n - 1)$, N は経験的に次式であたえられ、100GHz で 1%以下の精度をもつ。

$$N = 77.6 \frac{P_d}{T} + 64.8 \frac{P_v}{T} + 3.776 \times 10^5 \frac{P_v}{T^2} \quad (20)$$

P_d は乾燥大気分圧, P_v は水蒸気分圧である。第 1 - 2 項は変移分極による項であり、第 3 項は水分子の永久双極子モーメントによる項である (P の単位は hPa)。

N は気体の状態方程式を使って、密度で表すことができる。 M を分子の質量、 ρ :密度、 $R = 8.314$ (J/mol.K) 気体定数である。

$$P = \rho RT/M$$

対流圏内の乾燥大気では $M_D = 28.96$ g/mol, $M_v = 18.02$ g/mol であり、乾燥大気、水蒸気それぞれについて気体の方程式が成り立つので、 $P_T = P_d + P_v$, $\rho_T = \rho_d + \rho_v$ を使うと、

$$P_T = \left(\frac{\rho_d}{M_d} + \frac{\rho_v}{M_v} \right) RT = (\rho_d + \rho_v) \frac{RT}{M_T}, \quad \frac{1}{M_T} \equiv \left(\frac{1}{M_d} \frac{\rho_d}{\rho_T} + \frac{1}{M_v} \frac{\rho_v}{\rho_T} \right) \quad (21)$$

これと $\rho_d = \rho_T - \rho_v$ を使って、(23) 式を書き直すと

$$\begin{aligned} N &= 77.6 \frac{\rho_d R}{M_d} + 64.8 \frac{\rho_v R}{M_v} + 3.776 \times 10^5 \frac{\rho_v R}{M_v T} \\ &= 0.22278 \rho_T + R \left(\frac{0.648}{M_v} - \frac{0.776}{M_d} \right) \rho_v + 1742 \frac{\rho_v}{T} \\ &= 0.22278 \rho_T + 0.07619 \rho_v + 1742 \frac{\rho_v}{T} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\equiv N_d + N_v \quad (23)$$

ただし、 ρ の単位は g/m^3 。(22) 式の第 2 項は第 3 項に比べて小さいの、通常無視する。大気は高い精度で静水圧平衡が成り立つので、気圧と重力には

$$\frac{dP}{dh} = -\rho_T g \quad (24)$$

が成立する。 $g = 9.793 m/s^2$, 気体の方程式と、気温分布、気体の混合比を使って気圧の高度分布を計算できる。断熱気体と混合比一定を仮定すると、スケールハイト 8.5km の指数関数が得られる。静水圧平衡の条件の下では乾燥大気の Refractivity N は全密度や気温の高度分布によらず、地上の気圧 P_0 で表される。 g を一定と仮定すると、

$$P_0 = g \int_0^\infty \rho(h)dh \quad (25)$$

従って、(1.2.2)(23) 式から乾燥大気の Excess Path Length は

$$L_d = 10^{-6} \int_0^\infty N_d dh = A P_0 \quad (26)$$

ここで、 $A = 77.6 \frac{R}{M_d g} \times 10^{-6} = 0.2275$ (cm/mbar)、標準的な大気 $P_0 = 1013$ mbar のとき $L_d = 2230.4$ cm.

水蒸気は大気中で十分に混ざっておらず、地上の気象データと良い相関がない。平均的に水蒸気は 2km までの高さに指数関数的に分布している。状態方程式から水蒸気分圧と密度は

$$\rho_v = \frac{M_v P}{RT} = \frac{216.7}{T} P_v \quad (g/m^3)$$

であり、水蒸気分圧は、クラウジウス-クラペイロンの方程式から、温度 T の環境での (飽和) 標準水蒸気分圧が

$$P_{vs} = 6.11 \left(\frac{T}{273}\right)^{-5.3} e^{25.2(T-273)/T} \quad (\text{mb}) \quad (27)$$

と与えられ、相対湿度 $H = P_v/P_{vs}$ を使って、 $P_v = HP_{vs}$ で得られる。(22) 式の 第 3 項 (水分子の永久双極子モーメントによる Excess Path Length L_v は

$$L_v = 1742 \times 10^{-6} \int_0^\infty \frac{\rho_v(h)}{T(h)} dh \quad (28)$$

もし、大気が断熱的で、 ρ_v が 2km のスケールハイトで指数関数的に減少するなら T は 1.3K しか変わらないから定数として

$$L_v \cong 1.7633 \times 10^{-2} \frac{\rho_0}{T} \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{h}{h_0}\right\} dh = 1.7633 \times 10^{-2} h_0 \frac{217}{T^2} P_v = 7.6 \times 10^4 \frac{P_{v0}}{T^2} \quad (\text{cm}) \quad (29)$$

となる。もう一度乾燥大気の方とあわせて書くと

$$L = 0.2275 P_0 + 7.65 \times 10^4 \frac{P_{v0}}{T^2} \quad (\text{cm}) \quad (30)$$

がよく使われる。

これで、天頂方向の大気の Excess Path Length がわかった。観測では、ある仰角で天体を観測するため、大気を通過するパスが増える。この、鉛直方向のパスの長さ、あるの仰角のパスの長さの比をマッピング関数 $fm(El)$ と呼び、もっとも単純には、大気を平行な平板と考えて、 $fm(El) = 1/\sin(El)$ と近似されるが、VLBI ではさらに精度の高いマッピング関数が提案されており、

$$fm(El) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(El) + \frac{a}{\sin(El) + \frac{b}{\sin(El) + c}}} \quad (31)$$

の形で、Neil(1996) が係数 a, b, c を緯度、季節の関数として表したものが代表的である [3]。

1.2.3 電離層の遅延量 (参考文献「現代電磁波波動論」[4])

電離層をマイクロ波が通過するときの電波の屈折率は、プラズマ中の自由電子だけ電磁波の伝搬に影響するとするコールドプラズマ近似を使って、Appleton-Hartree の式で与えられる。

$$n^2 = 1 - \frac{2X}{2(1 - jZ) - \frac{Y_T^2}{1 - X - jZ} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1 - X - jZ)^2} + 4Y_L^2}} \quad (32)$$

$Z = \nu/\omega$ は衝突項を表し、 ν は単位時間あたりの衝突頻度、 ω は電磁波の角周波数。 $Y_T = Y \sin \theta$, $Y_L = Y \cos \theta$, $Y = \Omega_e/\omega$ は、サイクロトロン角周波数 $\Omega_e = eB/m$ を使って磁場の影響を表す。 e, m, B はそれぞれ、素電荷量、電子の質量、磁場の強度であり、 θ は電磁波の進行方向と磁場のなす角度である。 $X = (\omega_p/\omega)^2$ はプラ

ズマ振動の影響であり、プラズマ角周波数 $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / m \epsilon_0}$ の n_e, ϵ_0 はそれぞれ、電子密度と真空中の誘電率である。地球の電離層での 1GHz 以上のマイクロ波の周波数では、衝突の影響と、磁場の影響を無視して $n = 1 - \frac{1}{2}X$ が屈折率の良い近似を与える。波数は $k = n\omega/c$ で群速度 $v_g = \partial\omega/\partial k$ より Excess Delay は

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{g,\text{ion}} &= \int \left(\frac{1}{v_g} - \frac{1}{c} \right) dl \\ &\cong \frac{e^2}{2m\epsilon_0\omega^2 c} \text{TEC} \end{aligned} \quad (33)$$

$$= 1.34 \times 10^{-7} \frac{\text{TEC}}{f^2} \quad [\text{sec}] \quad (34)$$

ただし、 $\text{TEC} = \int n_e dl$ は電波伝搬経路中の電子の柱密度であり、 $1\text{TECU} = 10^{16} \text{electron}/\text{m}^2$ を単位として使う。

後で述べるように、測地/位置天文の VLBI 観測では S/X 2 周波の同時観測を行い、電離層の遅延を補正する。X-band, S-band の観測された遅延量をそれぞれ $\tau_{\text{obs},x}, \tau_{\text{obs},s}$ とし、幾何学的遅延や大気による遅延など非分散性の遅延をまとめて τ_{etc} とすると

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{obs},x} &= \tau_{\text{etc}} + A \times \text{TEC} / f_x^2 \\ \tau_{\text{obs},s} &= \tau_{\text{etc}} + A \times \text{TEC} / f_s^2 \end{aligned} \right\} \text{ただし } A = \frac{e^2}{2m\epsilon_0\omega^2 c} \quad (35)$$

これから伝搬方向の電子柱密度 TEC は

$$\text{TEC} = \frac{f_x^2 f_s^2}{f_x^2 - f_s^2} \frac{(\tau_{\text{obs},s} - \tau_{\text{obs},x})}{A} \quad (36)$$

とつまり、電離媒質の影響をのぞいた非分散性遅延量は

$$\tau_{\text{etc}} = \tau_{\text{obs},x} - \frac{f_s^2}{f_x^2 - f_s^2} (\tau_{\text{obs},s} - \tau_{\text{obs},x}) \quad (37)$$

として得られ、これを最小 2 乗解析に使用する。

2 VLBI の観測

VLBI の観測には大きく分けて、(1) 電波天文観測 (2) 測地/位置天文観測 (3) 宇宙飛翔体の観測がある。(1) は電波源天体の強度分布 (マップ) を作成することを目的としている。観測量として相互相関係数の振幅、位相を使い、FITS という天文画像用のデータベースファイルにデータを格納し、APIS という解析ソフトで解析を行う。(2) は遅延量 (主に群遅延量) を観測量として、最小 2 乗解析により観測局の位置 (XYZ)、地球回転パラメータ、電波源の座標 (赤経、赤緯) などを推定する。(3) はほぼ (2) と同様であるが、対象が人工電波源であるため、周波数帯域が狭いこと、電波源までの距離が有限であることなどが異なる。ここでは主に (2) について説明し、(3) にも少し触れる。



図 2: K5/VSSP32 システム。ラック組込型の PC4 台により最大 1024Mbps のデータレートで記録が可能である。

表 2: 受信機雑音温度 T_{rx} とシステム雑音温度 T_{sys}

バンド	周波数 (GHz)	T_{rx} (K)	T_{sys} (K)	開口効率	SEFD (Jy)	受信偏波
L	1.35 - 1.75	18	45	0.68	200	L/R
S	2.193 - 2.35	19	72	0.65	340	L/R
C	4.60 - 5.10	100	127	0.70	550	L
X-n (2007.12.14 まで)	8.18 - 8.60	41	52	0.68	230	L/R
X-n (2007.12.14 以降)	8.18 - 9.08			0.68		L/R
X-wH (2007.12.14 まで)	8.18 - 8.60 [#]	41	53	0.68	290	L/R
X-wH (2007.12.14 以降)	8.18 - 9.08			0.68		L/R
X-wL (2007.12.14 まで呼称 X-b)	8.58 - 9.08 [#]	-	50	0.68	270	L/R
X-wL (2007.12.14 以降)	7.86 - 8.36			0.68		L/R
K (2007.1.19 まで)	21.8 - 23.8	105	141*	0.5	850	L(R)
K (2007.1.19 以降)	22.0 - 24.0	105	141*	0.5	850	L(R)
Ka	31.7 - 33.7	85	150	0.4	1100	R(L)
Q	42.3 - 44.9	180	350	0.3	3500	L(R)

[#] : 8GHz LNA 広帯域用 (高域側に T_{sys} の上昇が見られる)。

* : IF 出力をパワーメータで測定することにより得た値

SEFD(システム等価フラックス密度) はシステム雑音温度 (K)、アンテナ開口面積、および開口効率から産出している。

2.1 観測機器、観測モード

測地、位置天文観測で使用する周波数は主に S(2GHz)/X(8GHz) の周波数帯である。参考までに、鹿島 34m アンテナの受信帯域を表 2 に示す。観測には主に K5/VSSP システムを使用し、2-8MHz 帯域 (サンプリング周波数 4-16MHz) を単位として、S-band 6channel X-band 10channel のトータル 16channel を周波数帯域全体を有効に利用するため振り分けて、観測を行っている。これは後で述べる「バンド幅合成」を使って有効帯域を広げ、高精度の遅延計測を行うためである。また、S/X 同時受信するのは、電離層の分散性遅延を補正するためである。図 2 に K5/VSSP32 のデータ収集系ラックの写真を示す。

表 1: VLBI の観測モード

観測	天体	ch 数	量子化 ビット	サンプリング 周波数
測地	クエーサ	16ch	1or2bit	4-16MHz
天文	クエーサ	16ch	2bit	4-16ch
	メーザ	2ch	2bit	32MHz
	クエーサ	1ch	2bit	1GHz
宇宙 飛行体	探査機	1-4ch	2bit	4-16MHz
	クエーサ	10ch	1or2bit	4-16MHz

アンテナで受信された信号は、低雑音増幅器を通して増幅された後、周波数変換器 (ダウンコンバータ) を使って、一定の帯域幅をもつ中間周波数 (IF) に変換されて、観測室に伝送される。そこで更にビデオ変換器によって、K5/VSSP32 で取得可能なビデオ帯の周波数に変換され、A/D 変換されて記録される。記録のビット数としては通常 1 ビットサンプリングが使用される。これは主に VLBI が広帯域の雑音信号を受信するためで、信号強度がガウス雑音的に確率分布する場合には、1 ビットサンプリングにより効率は $2/\pi = 64\%$ となることが知られている。広帯域のガウス雑音をサンプリングする場合にはこれで十分であるが、ラインスペクトル

の支配的な非ガウス雑音を取得する場合には、量子化ビット数をあげる必要がある。

2.2 観測スケジュール

VLBIの観測では、複数のアンテナが同時に同一天体を観測する必要があるため、観測に参加する観測局はスケジュールファイル [6] と呼ばれる、ファイルに書かれた予定に従って観測を行う。スケジュールファイルの例を図 3 に示す。フォーマットに関しては参考文献 [6] を参照のこと。スケジュールファイル作成のためのツールとしては NASA/GSFC(Goddard Space Flight Center) が開発した Unix で動作する sked[7] のほか、DOS 環境で動作する PC-SCHED[8] がある。

3 相関処理

天体の信号をふたつの電波望遠鏡で受信し、天体からの信号の到達時間差を計測するために、信号の相互相関係数を計算する。この処理を「相関処理」と呼んでいる。相互相関関数は、二つの時系列信号 $x(t)$, $y(t)$ が与えられたとき、

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)} \quad (38)$$

で定義され、相互相関係数は

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \overline{x(t)y(t+\tau)} / \sqrt{\overline{x^2} \overline{y^2}} \\ &= C_{xy}(\tau) / \sqrt{C_{xx}(0)C_{yy}(0)} \end{aligned} \quad (39)$$

で定義する [5]。 $\overline{x(t)}$ は $x(t)$ のアンサンブル平均値を表し、エルゴード性を仮定して、平均操作を時間平均に置き換えると

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt \quad (40)$$

ところで、 $x(t)$ のフーリエ変換を $X(\omega)$ とすると

$$x(t) = \int X(\omega) \exp\{j\omega t\}d\omega \quad (41)$$

式 (41) を (40) 式に代入して

$$\begin{aligned} C_{xy}(\tau) &= \int \int X(\omega)y(t+\tau) \exp\{j\omega t\}d\omega dt \\ &= \int X(\omega) \int y(t) \exp\{j\omega t\}dt \exp\{-j\omega\tau\}d\omega \\ &= \int X(\omega)Y^*(\omega) \exp\{-j\omega\tau\}d\omega \end{aligned} \quad (42)$$

$$= \int S_{xy}(\omega) \exp\{-j\omega\tau\}d\omega \quad (43)$$

最後に $S_{xy}(\omega) \equiv X(\omega)Y^*(\omega)$ とおいた。 $Y^*(\omega)$ は $Y(\omega)$ の複素共役である。式 (43) からわかるように、相互相関関数は、それぞれの時系列信号のフーリエ変換を掛け合わせ、逆フーリエ変換により時間領域に戻す方法でも計算することができる。実際に VLBI の「相関処理」においても、式 (40) のように時間領域で $C_{xy}(\tau)$ を計算する方式を「XF 型」、式 (43) のように、周波数領域で積をとる方法を「FX 型」と呼んでいる。遅延時間を観測量として計測する測地/位置天文の VLBI 観測では、相互相関関数を最大にする遅延時間 τ を観測量とする。

VLBIの観測では、256Mbps オーダの大量のデータ (表 1 参照) を取得処理するため、データ処理のステップが1次処理、2時処理と2つに分かれている。

1次処理では大量のデータを1秒～数秒程度の単位時間ごとに相関係数を計算 (式 (40) の計算と規格化を含む) し、データ量を大幅に小さくする。この1次処理のことを相関処理と呼んでいる。2次処理では1次処理結果を更に縮訳して、遅延時間や相互相関係数 (複素数) を精度良く求める作業を行う。特に、広い周波数帯域に割り振った複数のビデオチャンネルの相関出力結果を合成して高精度の遅延/遅延変化率を求める手法をバンド幅合成と呼んでいる。

(40) 式は簡単な積分であるが、実際の相関処理では、周波数変換のために「フリンジローテーション」とよばれる周波数回転などが含まれやや複雑である。測地/位置天文 VLBI では、基線を単位とする (Baseline Base) 解析が行われ、基線の X 局の時間を基準 (観測量のタイムタグ) として使用する。 \vec{X} 、 \vec{Y} をそれぞれ X, Y 局の局位置ベクトル、 \vec{S} を天体に向かう方向単位ベクトルとすると、基線ベクトルは $\vec{B} = \vec{Y} - \vec{X}$ 、幾何学的遅延量は

$$c\tau_g = -\vec{S} \cdot \vec{B} \quad (44)$$

で定義される。

天体からの信号を $A \exp\{j\omega t\}$ 、ノイズを n_x, n_y とし、ふたつの観測局 X, Y 局で受信される信号は、Y 局への信号到達時間差 τ_g を考慮して

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= A \exp\{j\omega t\}(t) + n_x \\ y(t) &= A \exp\{j\omega(t - \tau_g)\} + n_y \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

実際の観測ではビデオ帯域まで周波数変換してから記録するので、周波数変換に使用する局部発振器周波数 ω_0 を使って $\exp\{-j\omega_0 t\}$ をかけることに相当し、

$$\left. \begin{aligned} x'(t) &= A \exp\{j(\omega - \omega_0)t + \phi_x\}(t) + n'_x \\ y'(t) &= A \exp\{j(\omega - \omega_0)t - \omega\tau_g + \phi_y\} + n'_y \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

となる。 ϕ_x, ϕ_y は X, Y それぞれの局の局部発振器の位相である。(40) 式にあるように、Y 局に時間シフト ($t \rightarrow t + \tau_a$) をあたえて積和をとるため Y 局の信号は

$$\begin{aligned} y'(t + \tau_a) &= A \exp\{j[(\omega - \omega_0)(t + \tau_a) - \omega\tau_g + \phi_y]\} + n'_y \\ &= A \exp\{j[(\omega - \omega_0)t - \omega_0\tau_a - \omega(\tau_g - \tau_a) + \phi_y]\} + n'_y \end{aligned} \quad (47)$$

となる。 τ_a は予測される遅延量であり、相関処理の際には、 $\tau_a \sim \tau_g$ となるように、精度の高い予測遅延量を使って積分=平均操作し、相互相関係数を計算する。この式からわかるように、周波数変換したために、 $\exp\{-j\omega_0\tau_a\}$ の位相回転が生じる。この位相回転をとめるために $\exp\{j\omega_0\tau_a\}$ なる位相回転を与えることを、フリンジローテーションまたはフィンジストッピングと呼ぶ。 $x'(t)$ と $y'(t + \tau_a) \exp\{j\omega_0\tau_a\}$ の複素共役を掛け合わせて

$$\begin{aligned} x'(t) \cdot y'(t + \tau_a) \exp\{j\omega_0\tau_a\} &= |A|^2 \exp\{-j[\omega(\tau_a - \tau_g) + \phi_y - \phi_x]\} \\ &= |A|^2 \exp\left\{-j\left[\omega\left(\Delta\tau_0 + \Delta\dot{\tau}(t - t_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}\Delta\ddot{\tau}(t - t_{\text{ref}})^2 + \dots\right) + \phi_y - \phi_x\right]\right\} \end{aligned} \quad (48)$$

ここで $\Delta\dot{\tau}$ 、 $\Delta\ddot{\tau}$ は $\tau_a - \tau_g$ の残差を τ_{ref} のエポックの回りでテーラ展開した係数である。遅延時間 τ_g を式 (48) の位相回転が十分小さくなる程度の精度をもつ予測遅延量を使って計算し、1秒～数秒を単位として積分=平均操作を行い、規格化を行った相関係数を1次処理結果 $R_{xy}(t_i)$ ($i=1, \dots, n$) とする。

4 バンド幅合成（精密群遅延計測）

遅延時間を完全には予測することができないので、相互相関係数には遅延時間、及び変化率の残差（ $\Delta\dot{\tau}$ 、 $\Delta\dot{\tau}$ ）によるゆっくりとした位相回転が残っている。式(48)の時間の2次の残差の項は無視できる程度に小さい。そこで位相項は2次以上の時間項を無視して $\Delta\tau_g + \Delta\dot{\tau}_g(t - t_{\text{ref}})$ と置き換え、更に雑音（ N_x, N_y ）の分散で規格化を行って相互相関係数として表すと

$$R(\omega, \Delta\tau_g, \Delta\dot{\tau}_g)_{xy} = \frac{|A|^2}{\sigma(N)^2} \exp\{-j[\omega(\Delta\tau_g + \Delta\dot{\tau}_g(t - t_{\text{ref}})) + \Delta\phi]\} \quad (49)$$

残差である $\Delta\tau_g, \Delta\dot{\tau}_g$ を求めるため、適当な補正量 $\Delta\tau_c, \Delta\dot{\tau}_c$ を使って補正項 $\exp\{j\omega(\Delta\tau_c + \Delta\dot{\tau}_c(t - t_{\text{ref}}))\}$ を(49)に掛けて周波数方向（ ω ）、時間方向（ t ）に積分する。

$$\begin{aligned} & \int_0^T R(\omega, \Delta\tau_g, \Delta\dot{\tau}_g)_{xy} \exp\{j\omega(\Delta\tau_c + \Delta\dot{\tau}_c(t - t_{\text{ref}}))\} d\omega dt \\ &= \frac{|A|^2}{\sigma(N)^2} \exp\{-j\Delta\phi\} \int_{\omega_0}^{\omega_0+B} \int_0^T \exp\{-j[\omega((\Delta\tau_g - \Delta\tau_c) + (\Delta\dot{\tau}_g - \Delta\dot{\tau}_c)(t - t_{\text{ref}}))]\} d\omega dt \\ &= B \frac{|A|^2}{\sigma(N)^2} \exp\{-j\Delta\phi\} \exp\{-j(\omega + \frac{B}{2})(\Delta\tau_g - \Delta\tau_c)\} \int_0^T \text{sinc}\{\frac{B}{2}\delta\tau_{g-c}\} \exp\{-j(\omega + \frac{B}{2})(\Delta\dot{\tau}_g - \Delta\dot{\tau}_c)(t - t_{\text{ref}})\} dt \\ &= BT \frac{|A|^2}{\sigma(N)^2} \exp\{-j\Delta\phi\} \exp\{-j(\omega + \frac{B}{2})(\Delta\tau_g - \Delta\tau_c + (\Delta\dot{\tau}_g - \Delta\dot{\tau}_c)(\frac{T}{2} - t_{\text{ref}}))\} \\ & \quad \times \text{sinc}\{\frac{B}{2}\delta\tau_{g-c}\} \text{sinc}\{(\omega + \frac{B}{2})(\Delta\dot{\tau}_g - \Delta\dot{\tau}_c)\frac{T}{2}\} \quad (50) \end{aligned}$$

ここで $\text{sinc}(\alpha) \equiv \sin \alpha / \alpha$ 、 $\delta\tau_{g-c} \equiv \Delta\tau_g - \Delta\tau_c + (\Delta\dot{\tau}_c - \Delta\dot{\tau}_c)(t - t_{\text{ref}})$ である。 $\text{sinc}(B\delta\tau_{g-c})$ は $t \in [0, T]$ の範囲で変化が小さいので、定数として積分の外に出した。 sinc 関数の部分を見て分かるように、この関数は $\Delta\tau_c \rightarrow \Delta\tau_g$ 、 $\Delta\dot{\tau}_c \rightarrow \Delta\dot{\tau}_g$ で最大となる関数であり、最大値を探すことにより、 $\Delta\tau_g$ 、 $\Delta\dot{\tau}_g$ が求められ、トータルの遅延量 $\tau_a + \Delta\tau_c$ 、トータルの遅延変化率 $\dot{\tau}_a + \Delta\dot{\tau}_c$ が得られる。

これは、単一のチャンネルで決められる遅延量で、Single Band Delay と呼ばれる。遅延の計測精度は、帯域幅の逆数に比例し、この場合は帯域幅 B である。

バンド幅合成は、(50)を複数のチャンネルについて更にた形で与えられる。 $\omega \rightarrow \omega_i$ として ($i=1..n$) の相互相関係数を位相も含めて合成する。 ω の含まれる項以外を G として表すとバンド幅合成関数は

$$\begin{aligned} F(\Delta\tau_c, \Delta\dot{\tau}_c) &= G \sum_{i=1}^n \text{sinc}\{(\omega_i + \frac{B}{2})(\Delta\dot{\tau}_g - \Delta\dot{\tau}_c)\frac{T}{2}\} \\ & \quad \times \exp\{-j[\Delta\phi_i + (\omega_i + \frac{B}{2})(\Delta\tau_g - \Delta\tau_c + (\Delta\dot{\tau}_g) - \Delta\dot{\tau}_c)(\frac{T}{2} - t_{\text{ref}})]\} \quad (51) \end{aligned}$$

$$= G \sum_{i=1}^n \exp\{-j[\Delta\phi_i + (\omega_i + \frac{B}{2})(\Delta\tau_g - \Delta\tau_c)]\} \quad (52)$$

レートレートの補正値を精度よく推定すれば $\Delta\dot{\tau}_g - \Delta\dot{\tau}_c \sim 0$ とできるので、(51)式は(52)の用に近似できる。

ここで、 $\Delta\phi_i$ は各周波数チャンネルごとの位相差であり、ローカル発振器の位相差の他に、信号伝送経路の遅延による効果も含んでいる。この計算は、相関係数の位相が線形な位相関係で周波数方向に並んでいるときに最大となる。この関数の最大値の探索は、各チャンネルの相関係数位相勾配の最小2乗推定と等価である⁴。広い周波数帯に分布させた複数のチャンネルを合成することにより、遅延計測精度が向上する。しかし実際には、このままでは $\Delta\phi_i$ の効果により、周波数方向の位相の並びは通常バラバラになっている。

このチャンネル毎の位相差を補正するために位相校正信号 (PCAL) を使用する。PCAL は通常フロントエンド部の LNA 前より、方向性結合器を使って受信信号に混ぜて注入される信号で、1MHz 毎の正弦波である。時

⁴証明は、例えば [9] 参照

間領域では $1\mu\text{sec}$ 間隔のパルス列である。信号強度は、1kHz の帯域幅 (RBW) で受信機ノイズに対して +10dB 程度である⁵。PCAL 信号の位相は PCAL 注入点では揃っていると仮定できるので、記録された信号を相関処理する際に、記録帯域内に含まれる PCAL トーン信号と同じ周波数の信号を掛けて、位相を抽出し、この位相で補正を行う $\Delta\phi_i = \phi_{y,i} - \phi_{x,i}$ であり、X,Y 局のチャンネル i の PCAL 信号の検出された位相をそれぞれ $\phi_{x,i}^{pcal}, \phi_{y,i}^{pcal}$ とすると $\Delta\phi_i^{pcal} = \phi_{y,i}^{pcal} - \phi_{x,i}^{pcal}$ を補正して

$$F(\Delta\tau_c, \Delta\dot{\tau}_c) \exp\{j\Delta\phi_i^{pcal}\} = G \sum_{i=1}^n \exp\{-j[(\Delta\phi_i - \Delta\phi_i^{pcal} + (\omega_i + \frac{B}{2})(\Delta\tau_g - \Delta\tau_c))]\} \quad (53)$$

とすることで、周波数チャンネル毎の位相が周波数にほぼ比例する (群遅延特性) ようになり、遅延を精度よく計測することができる。

5 相関振幅、SNR、と誤差 (参考文献 [12])

アンテナが受信する信号を、天体のアンテナ温度 ((11) 式)、システム雑音温度 ((17) 式) を使って表すと、電磁波の振幅の 2 乗がエネルギーと同じ次元であるから

$$\begin{aligned} X_1(\omega) &= \sqrt{T_{a1}}S(\omega) + \sqrt{T_{s1}}N_1(\omega) \\ X_2(\omega) &= \sqrt{T_{a2}}S(\omega) + \sqrt{T_{s2}}N_2(\omega) \end{aligned} \quad (54)$$

但し、 T_{a1}, T_{a2} はそれぞれ天体受信により上昇した 1 局および 2 局のアンテナ温度、 T_{s1}, T_{s2} は 1 局および 2 局のシステム雑音に起因する温度である。 $S(\omega), N_1(\omega), N_2(\omega)$ は Real, Imaginary が独立な複素数ガウシアンノイズである。相互相関スペクトルは、($\tau_0, \dot{\tau}$ を考えて) 遅延、フリンジ回転も補正したものとして、

$$\begin{aligned} S_{12} &= X_1(\omega)X_2^*(\omega)e^{-j\omega(\tau+\dot{\tau}t)} \\ &= \sqrt{T_{a1}T_{a2}}S(\omega)S^*(\omega) + \sqrt{T_{s1}T_{a2}}N_1(\omega)S^*(\omega) \\ &\quad + \sqrt{T_{a1}T_{s2}}S(\omega)N_2^*(\omega) + \sqrt{T_{s1}T_{s2}}N_1(\omega)N_2^*(\omega) \end{aligned} \quad (55)$$

相関係数の定義 ((39) 式) から、相関振幅は

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{(T_{a1}+T_{s1})(T_{a2}+T_{s2})}} \sim \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{T_{s1}T_{s2}}} = \frac{\pi}{8k_B}SD_1D_2\sqrt{\frac{\eta_1\eta_2}{T_{s1}T_{s2}}} \quad (56)$$

後半は、天体の信号はシステム雑音に対して小さいこと、 $T_a \ll T_s$ とアンテナ温度とフラックスの関係式 (11) を使った。

帯域 B 、平均化時間 T で平均化したときの信号対雑音比 (SNR) は (55) 式の第 1 項の平均値と分散はして

$$(\text{平均値}): |S| = \sqrt{T_{a1}T_{a2}} \quad (\text{分散}): \sigma_{N_s} = \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{BT}} \quad (57)$$

但し、独立なフーリエ成分の数 $2BT$ で正規化している。第 2 項以降の分散は、実部、虚部毎に

$$\sigma_N^2 = \frac{T_{s1}T_{a1} + T_{a2}T_{s2} + T_{s1}T_{s2}}{2BT} \quad (58)$$

の値を持つ。相関振幅の信号対雑音比は

$$\text{SNR} = \frac{|S|}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{T_{s1}T_{a1} + T_{a2}T_{s2} + T_{s1}T_{s2}}} \sqrt{2BT} \sim \rho_0 \sqrt{2BT} \quad (59)$$

そのほか、主要な計測値及び誤差の表式についてまとめておく。

⁵相関処理する際に PCAL 検出を行い、その位相が 1-2 度程度の誤差になるように、強度を調整する。記録帯域幅が広がると、一本の PCAL 信号強度は相対的に弱くなる。

表 3: 主要な計測値、誤差の表式

相関係数	$\rho_0 = \frac{\pi}{8k_B} S D_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2}{T_{s1} T_{s2}}}$
信号対雑音比	$SNR = \rho_0 \sqrt{2BT}$
フリンジ位相誤差	$\sigma_\phi = \frac{1}{SNR}$
粗決定遅延誤差	$\sigma_{\tau_s} = \frac{\sqrt{12}}{2\pi B \cdot SNR}$
精決定遅延誤差	$\sigma_{\tau_p} = \frac{1}{2\pi \sigma_f \cdot SNR}$
有効帯域幅	$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}$
遅延変化率誤差	$\sigma_{\dot{\tau}} = \frac{\sqrt{12}}{2\pi f T \cdot SNR}$

6 おわりに

以上、VLBIの基礎について概説した。測地VLBIの解析や物理モデルなどについては、参考文献 [10, 11] を参照されたい。

参考文献

- [1] 赤羽、海部、田原、「宇宙電波天文学」 共立出版 ISBN 4-320-04619-6
- [2] Thompson, Moran, and Swenson, "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy", Chapter 13 Propagation Effect, Kluwer pub. ISBN: 0-89464-859-4, 1994.
- [3] Neil A. E., "Global Mapping Function for the atmosphere delay at radio wavelength", J. Geophys. Res., 101, pp.3227-3246 (1996).
- [4] 前田憲一、木村磐根、現代電磁波動論 オーム社、1994
- [5] 日野幹雄、スペクトル解析、朝倉書店、1997
- [6] http://lupus.gsfc.nasa.gov/files_user_manuals/sked/skfile.pdf
- [7] <ftp://gemini.gsfc.nasa.gov/pub/sked/catalogs>
- [8] <http://www.evlbi.org/scheduling/pc-sched.html>
- [9] Sekido M., "Appendix B:Equivalence of Bandwidth Synthesis and Least Square Estimation of Group Delay", Pulsar Astrometry by VLBI, PhD Thesis 総合研究大学院大学, 2001
- [10] 高橋 富士信、近藤哲朗、小山泰弘, VLBI 技術, オーム社 ISBN 4-274-07852-3,1997.
- [11] IERS Convention 2003.<http://www.iers.org/>
- [12] Whitney,A.R., 3.3 Signal-to-Noise Analysis, Precision Godesy and Astrometry via Very-Long-Baseline Interferometry, Ph.D Thesis, MIT, 1974.

図 3: スケジュールファイルの例 (一部)

```

$EXPER HY5330
$PARAM
DURATION 50 IDLE 0 CALIBRATION 10 LOOKAHEAD 10 MINIMUM 0
MINSKAN 120 VSCAN N MODSCAN 10 WIDTH 79 CORSYNCH 20
VIS SUB SNR AUTO CONFIRM Y CHANGE 0 MODULAR 1 MINBETWEEN 0
FREQUENCY KS PREDB PREDB MIDOB MIDOB POSTOB POSTOB
SYNCHRONIZE OFF PRFLAG YYYN SETUP 20 PARITY 70 PREPASS 0
SOURCE 5 HEAD 6 TAPETM 1 EARLY 0 MIDTP 0 SUNDIS 5
SUBNET ORGUYHMc
ELEVATION 0 7.0 R 6.0 G 6.0 U 6.0 Y 6.0 H 6.0 K 6.0 M 6.0
SCAN 1 360 2 90 3 250 4 95 5 267 6 90 7 90 8 90 9 232 10 126 11 90 12 90
SCAN 13 90 14 90 15 122 16 90
$SOURCES
1928+738 $ 19 27 48.495196 +73 58 1.56996 2000.0 0.00 ITRF93
0059+581 $ 01 02 45.762413 +58 24 11.13656 2000.0 0.00 ITRF93
0104-408 $ 01 06 45.107728 -40 34 19.96533 2000.0 0.00 ITRF93
0316+413 3C84 03 19 48.160104 +41 30 42.10288 2000.0 0.00 ITRF93
0420-014 $ 04 23 15.800729 -01 20 33.06462 2000.0 0.00 ITRF93
0552+398 $ 05 55 30.805614 +39 48 49.16516 2000.0 0.00 ITRF93
0727-115 $ 07 30 19.112471 -11 41 12.59959 2000.0 0.00 ITRF93
0923+392 4C39.25 09 27 3.013450 +39 02 20.85411 2000.0 0.00 ITRF93
1128+385 $ 11 30 53.282261 +38 15 18.55206 2000.0 0.00 ITRF93
1226+023 3C273B 12 29 06.699719 +02 03 8.59880 2000.0 0.00 ITRF93
1228+126 3C274 12 30 49.423381 +12 23 28.04393 2000.0 0.00 ITRF93
1253-055 3C279 12 56 11.166506 -05 47 21.52402 2000.0 0.00 ITRF93
1641+399 3C345 16 42 58.809967 +39 48 36.99406 2000.0 0.00 ITRF93
1730-130 NRA0530 17 33 02.705756 -13 04 49.54730 2000.0 0.00 ITRF93
1745+624 $ 17 46 14.03414 +62 26 54.7385 2000.0 0.00 ITRF93
1807+698 3C371 18 06 50.68063 +69 49 28.1087 2000.0 0.00 ITRF93
2134+004 2134+00 21 36 38.586322 +00 41 54.21410 2000.0 0.00 ITRF93
2255-282 $ 22 58 5.962576 -27 58 21.25967 2000.0 0.00 ITRF93
2251+158 3C454.3 22 53 57.747944 +16 08 53.56102 2000.0 0.00 ITRF93
$STATIONS
A D KASHIM34 AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PD TO HD
A C ALGOPARK AZEL 0.0000 24.4 0 41.0 453.0 9.4 0 8.8 86.8 47.0 AP 03 --
A G KOGANEI AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PG TG HG
A U USUDA64 AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PU TU HU
A Y GIFU11 AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PY TY HY
A V UCHINOUR AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PV TV HV
A K YAMAGU32 AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PK TK HK
A M MIZNA020 AZEL 0.0000 180.0 0 95.0 625.0 180.0 0 6.0 88.0 11.0 PM TM HM
A T TSUKUB32 AZEL 0.00000 180.0 14 10.0 710.0 180.0 14 5.0 88.0 32.0 TS TS 108
A A AIRA AZEL 0.00000 180.0 0 30.0 690.0 180.0 0 5.0 88.0 10.0 AI AI AI
A C TITIJIMA AZEL 0.00000 180.0 0 30.0 690.0 180.0 0 5.0 88.0 10.0 CC CC CC
A J SINTOTU3 AZEL 0.00000 60.0 0 20.0 700.0 60.0 0 5.0 88.0 3.8 S3 S3 S3
P PD KASHIM34 -3997649.23600 3276690.80710 3724278.89240 KSP96001
P AP ALGOPARK 918034.75611 -4346132.26769 4561971.16681 72828201 78.07 45.96 GLB1069
P PG KOGANEI -3941937.47909 3368150.90799 3702235.28815 KSP96001
P PU USUDA64 -3855355.50082 3427427.52323 3740971.23563 UNKN0WN_
P PY GIFU11 -3787123.36080 3564181.69380 3680274.90740 CUTE01EX
P PV UCHINOUR -3586228.63900 4114103.91800 3290224.77100 ISAS_INF
P PK YAMAGU32 -3502535.90849 3950950.21931 3566374.00298 HANDYGPS
P PM MIZNA020 -3857241.8397 3108784.8610 4003900.5837 KSP96001
P Ts TSUKUB32 -3957408.7512 3310229.3466 3737494.8360 73452301 219.91 36.11 GSI-VLBI
P Ai AIRA -3530219.3223 4118797.5419 3344015.9059 73482201 229.40 31.82 GSISRV
P Cc TITIJIMA -4490618.4692 3483908.1666 2884899.2057 73472101 217.81 27.10 GSISRV
P S3 SINTOTU3 -3642141.8448 2861496.6425 4370361.7179 73462001 218.16 43.53 GLB886
$CODES
F KSP-SX KS
C KS X 8195.99 10000.0 1 C 4.000 1(15) 2(16)
C KS X 8205.99 10000.0 2 C 4.000 1(1) 2(2)
C KS X 8235.99 10000.0 3 C 4.000 1(17) 2(18)
C KS X 8295.99 10000.0 4 C 4.000 1(3) 2(4)
C KS X 8405.99 10000.0 5 C 4.000 1(19) 2(20)
C KS X 8485.99 10000.0 6 C 4.000 1(15) 2(16)
C KS X 8535.99 10000.0 7 C 4.000 1(1) 2(2)
C KS X 8555.99 10000.0 8 C 4.000 1(17) 2(18)
C KS S 2239.99 10000.0 9 C 4.000 1(3) 2(4)
C KS S 2244.99 10000.0 10 C 4.000 1(19) 2(20)
C KS S 2259.99 10000.0 11 C 4.000 1(25) 2(26)
C KS S 2289.99 10000.0 12 C 4.000 1(11) 2(12)
C KS S 2319.99 10000.0 13 C 4.000 1(27) 2(28)
C KS S 2329.99 10000.0 14 C 4.000 1(13) 2(14)
C KS S 2344.99 10000.0 15 C 4.000 1(29) 2(30)
C KS S 2354.99 10000.0 16 C 4.000 1(15) 2(16)
L O KS X IF1N 7580.00 1H 2H 3H 4H 5H
L O KS H IF3N 7580.00 6H 7H 8H
L O KS S IF2N 1520.00 9H 10H 11H 12H 13H 14H 15H 16H
$KED
3C273B 10 KS PREDB 05329214300 160 MIDOB 0 POSTUB 0-R-U-M-T-A-C-V- 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 YNNN
1352-104 10 KS PREDB 05329214800 350 MIDOB 0 POSTUB 0-R-U-M-T-A-C-V- 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 YNNN
HYBS2200 10 KS PREDB 05329215832 140 MIDOB 0 POSTUB 0-R-U-M-T-A-C-V- 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 1F0000 YNNN

```