

天体測定学 II 2007-12

1 干渉計による天体位置計測

すでに述べたように、干渉計の重要な観測量として幾何学的遅延時間 τ_g がある。

$$\tau_g = \frac{\vec{B} \cdot \vec{s}}{c}. \quad (1)$$

ここで、基線ベクトル \vec{B} が既知であれば、幾何学的遅延時間の観測（厳密には2つ以上の独立な計測が必要）から、天体の位置ベクトル \vec{s} を得ることができる。これが干渉計による位置計測の原理である。

具体的には、遅延追尾後のパワースペクトルが

$$S(\nu) = F_\nu e^{2\pi i(ux+vy)} \quad (2)$$

であり、位相項については

$$\phi = 2\pi\nu(\tau_g - \tau_0) = 2\pi(ux + vy) \quad (3)$$

の関係がある。この式は式 (1) を追尾中心に対する残差として具体的に書き下したものになる。従って、パワースペクトルの位相項から、追尾中心に対する残差位置 (x, y) を求めることができるのである。

2 遅延誤差と位置誤差

直接の観測量である幾何学的遅延時間に、ある観測誤差が付加されたときに、天体位置の誤差がどのように与えられるかを考える。遅延時間の測定誤差を $\Delta\tau_g$ とし、このときの見かけの天体位置ベクトルを \vec{s}' とすると、

$$\tau_g + \Delta\tau_g = \frac{\vec{B} \cdot \vec{s}'}{c}. \quad (4)$$

一方、誤差の無いときの遅延時間と天体位置の間には式 (1) の関係があるから、これらの式の差をとると

$$\Delta\tau_g = \frac{\vec{B} \cdot (\vec{s}' - \vec{s})}{c} \equiv \frac{\vec{B} \cdot (\Delta\vec{s})}{c}, \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\vec{s}$ は天体位置の変化量であり、これが天体位置の計測誤差を表す。この式から天体位置誤差を次元解析的にオーダー評価すると、

$$|\Delta s| \approx \frac{c\Delta\tau_g}{|B|} \quad (6)$$

すなわち、天体位置誤差は、遅延時間誤差を光路長に換算した量 $c\Delta\tau_g$ と基線長 $|B|$ の比で与えられることがわかる。

VERA の場合、最大基線長から $B \approx 2300$ km であり、目標精度を $|\Delta s| = 10 \mu\text{as}$ ($= 5 \times 10^{-11}$ rad) とすると、要求される幾何学的遅延時間の測定精度は

$$\frac{c\Delta\tau_g}{|B|} \approx 5 \times 10^{-11}$$

より、光路長換算で

$$c\Delta\tau_g \sim 0.1 \text{ mm},$$

時間換算では

$$\Delta\tau_g \sim 0.3 \text{ psec},$$

となる。ここで、psec (ピコ秒) は 10^{-12} 秒を表す。このように、高精度で位置天文学的な観測を行なうためには、非常に高い精度での遅延の決定が不可欠になる。

3 大気の問題

上記のような高い精度を達成する上で、最大の困難となるのが大気存在である。大気中の光速は真空中の光速 c よりも小さくなるので、その効果により付加遅延が発生する。大気による遅延は、乾燥大気成分と湿潤大気成分 (水蒸気) の遅延に大別され、以下のような特徴を持っている。

- 乾燥大気成分：1 気圧、水蒸気圧 0 状態で、光路長換算で約 2.3m 相当の遅延。ほぼ固定値である。
- 水蒸気成分：水蒸気分圧に大きく依存し、典型的には 0 から 30 cm 程度。激しく時間変動し、地表付近では数分間に数 cm 程度変動する。

上記のうち、特に水蒸気成分は激しく時間変動するので、位置天文観測を行なう上で致命的な誤差要因となる。

4 位相補償観測

水蒸気ゆらぎは数 cm のスケールを持つので、普通の地上観測では位置精度 $10 \mu\text{as}$ を達成するために必要な遅延精度 (光路長換算で 0.1 mm) を達成することはできない。この問題を回避するために考案された方法が近傍の 2 つの天体をほぼ同時に観測することで大気の揺らぎを打ち消す位相補償である。

いま、2 つの天体を同時に観測し、それぞれの天体について遅延時間を計測したとする (天体 1 を目標天体、天体 2 を基準天体とする)。このとき、それぞれの天体の観測には大気による付加遅延項が加わるので

$$\tau_{\text{obs},1} = \frac{\vec{B} \cdot \vec{s}_1}{c} + \tau_{\text{atm}}(t) \quad (7)$$

$$\tau_{\text{obs},2} = \frac{\vec{B} \cdot \vec{s}_2}{c} + \tau'_{\text{atm}}(t) \quad (8)$$

となる。このとき、2つの天体が天球面上で十分近ければ（例えば数度以内）、大気の揺らぎはほぼ共通化される（すなわち $\tau_{\text{atm}}(t) \sim \tau'_{\text{atm}}(t)$ ）よって、2つの式の差分を取ると、

$$\Delta\tau_{21} \equiv \tau_{\text{obs},2} - \tau_{\text{obs},1} = \frac{\vec{B} \cdot (\vec{s}_2 - \vec{s}_1)}{c} \quad (9)$$

すなわち、観測量 $\Delta\tau_{21}$ から、大気の揺らぎに影響されずに天体の相対位置 $(\vec{s}_2 - \vec{s}_1)$ を計測することができる。

これを実現するには、VERAのように2ビームの同時受信システムを使用する。2ビームを持たない通常の電波望遠鏡の場合は、2天体を短いサイクルで交互に観測するスイッチング法という方法を代用する。スイッチングの場合、大気の揺らぎが変動する時間スケール（数分）よりも短い間に2天体間を切り替える必要がある。この場合、基準天体を観測するや、アンテナの駆動時間を考えると、目標天体に望遠鏡が向いている時間は全観測時間の25%程度となり、観測効率が悪い。

5 位置天文観測に要求される事項

すでに述べたように、VERAの目標精度 $10 \mu\text{as}$ は 5×10^{-11} rad に相当する。従って、遅延時間を元に天体位置を得るには、その換算に必要な計算もこれ以下の十分な精度（例えば 10^{-12} 程度）で行なわなければ行けない。具体的には、地球固定座標系で表された基線ベクトルを、天体位置を記述する赤道座標（例えば J2000 系）に正しく座標変換して、基線と遅延時間の関係を求める必要がある。そのためには一般相対論的效果までを正しく扱った、4次元的な座標変換が必要である。

以下に位置天文計測に際して考慮すべき事柄をまとめる。

座標回転

局位置は地球固定座標系で記述され、地球は天球面に対して回転運動するので、座標回転が必要である。

- 歳差：地球回転軸の天球に対する運動のうち、26000年周期の最大成分。
- 章動：地球回転軸の天球に対する運動のうち、歳差以外の高次項。
- 日周運動：地球の自転。厳密には24時間ではなく、大気との角運動量交換などの効果により変動している。
- 極運動：地球の自転軸が地面に対して運動する現象。1年程度の間に極位置が10m程度地面に対して移動する。

相対論効果

地球は太陽の重力場中を公転している。公転速度は $v_{\oplus} \approx 30 \text{ km/s}$ であり、相対論的效果は $v_{\oplus}^2/c^2 \approx 10^{-8}$ のオーダーで効いてくる。これは必要精度 10^{-12} に比べれば桁違いに大きい効果である。また、地球重力場による時間の遅れ（地表の時計と無限遠の時計の歩度の差）は 7×10^{-10} であり、これも無視できない。これらを考慮した遅延時間の計算が要求される。

局位置変動

観測局位置も地球表面に対して静止してはおらず、位置は変動する。

- 潮汐による局位置変動：月や太陽の重力により 1 日スケールで最大 30cm 程度地殻が伸び縮みする。
- プレート運動：観測局位置は地殻の動きにより系統的に変化する。年間数 cm 程度

伝播効果

宇宙空間からの電波が観測局に到達するまでに、伝播媒質の影響を受ける。

- 大気：乾燥成分約 2.3 m、水蒸気成分は最大 30 cm で大きく変動。
- 電離層：高層大気のパラズマによる遅延の効果。周波数依存性（分散性）あり。

すなわち、電波干渉計による位置天文学は、プレート運動、地球回転から高層大気を含む地球物理学、さらには相対性理論に基づく座標変換など様々な学問に支えられて成立している、総合科学である。