

多チャンネル水蒸気ラジオメータによる超過光路長の推定精度

佐藤 克久、原 忠徳 (国立天文台・水沢)

1. はじめに

VLBI 観測では、水蒸気による大気内電波伝播遅延が依然として大きな観測誤差要因となっている。この誤差の除去には、伝播遅延量を水蒸気ラジオメータ (WVR) 等により別途推定し、データ解析過程へ反映したり、Differential VLBI 法などの観測手法で伝播遅延量の影響を小さくする手法が用いられている。

この内 WVR では、水分子吸収線付近の特定周波数での大気輝度温度の測定から大気超過光路長 (EPL) を推定しているが、水滴などのコンチニウム成分を取り除く目的で2チャンネル以上の周波数で観測する事が必要となっている。しかしながら、観測するチャンネル数や周波数の組み合わせとEPL推定精度との関係が必ずしも明確とはなっていないので、ゾンデデータを基にしたシミュレーションによりこれらの関係を検証した。

2. ゾンデデータによるEPLシミュレーション

WVR の被測定量は観測周波数における大気輝度温度であるが、ゾンデデータの被測定量は計測標高での湿度、気温、気圧であり、これら被測定量同士を関連付けする必要がある。

ゾンデデータと EPL との関係はスミス・ワイントラップによる屈折率の高さ方向の積分として求められ [1]、周波数依存性は少ない。一方、ゾンデデータと大気輝度温度の関係はリーベの吸収係数 [2] を用いて関係付けられるが、周波数依存性が存在する。今回の EPL シミュレーションのフローを右図に示す。

今回使用したゾンデデータは、秋田観測点の1995年のものである。

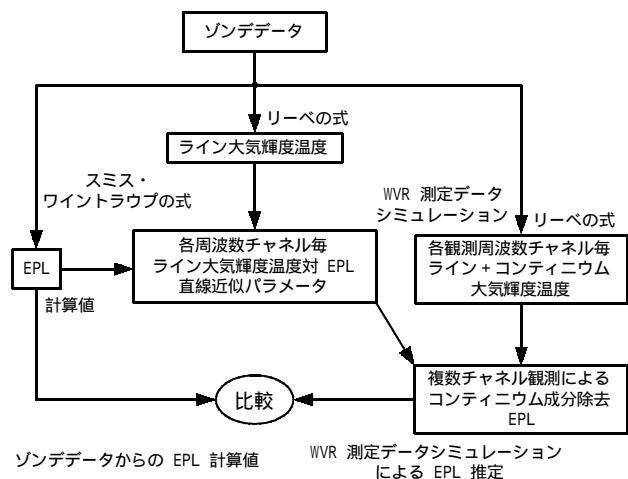


図1: EPL シミュレーションフロー

3. 大気輝度温度の周波数依存性

図1のシミュレーションフロー中ではライン成分のみの大気輝度温度と EPL について、両者の関係を直線近似によりパラメータとして求めている。大気輝度温度は 22.2GHz でピークとなる大気中水蒸気による吸収を反映する周波数依存性を持っている。ゾンデデータから試算された大気輝度温度の周波数依存性の様子を右図に示す。図では横軸 EPL となっており、等価的に大気中水蒸気量を表している。従って、同じ水蒸気量でも 20GHz での大気輝度温度と 22GHz での大気輝度温度との比は約2倍となっている事が見て取れる。

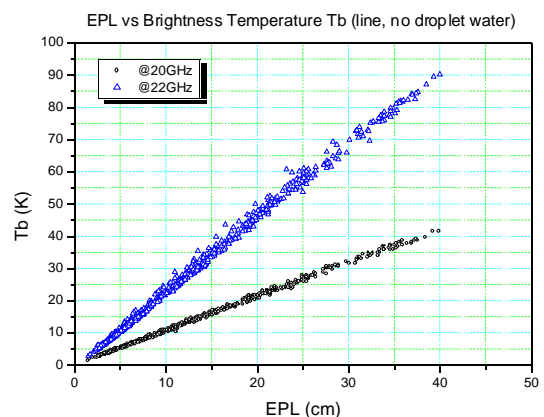


図2: 大気輝度温度の周波数依存性

4. 3チャンネル WVR による EPL 推定精度

特定観測周波数チャンネルによって大気輝度温度を測定する WVR は、ライン成分以外に水滴や乾燥大気その他、赤外領域での水蒸気吸収によるコンティニウム成分が重畳しており、このコンティニウム成分の除去精度が EPL 測定精度に影響する事になる。このコンティニウム成分を除去する為に、一般的に WVR は複数観測周波数チャンネルによる同時測定を行う。

そこで、観測周波数を 19GHz ~ 25GHz 迄の間の 3 チャンネルを選定した場合、EPL 推定精度がどうなるか試算した。結果を図 3 に示す。図 3 では、19&20&25 GHz の周波数の組み合わせが良い結果を示している。コンティニウム成分の 2 次曲線がいかによくフィットされるかで、このコンティニウム成分の除去精度が決まる訳で、観測周波数の組み合わせが EPL 推定精度を大きく左右している事が分かる。図中、Droplet=1.0 は、1g/m³ の水滴が 1km の厚さで存在している場合を表している。

一方、同じ 3 チャンネル型で 19 & 22 & 25GHz の周波数組み合わせを採用したオーエンスバレー電波天文台 (OVRO) の例 [3] では、図 4 に示す結果となった。は 3 観測周波数チャンネルを用い、コンティニウム成分の特性曲線を直線近似によって推定した場合、は等間隔 3 チャンネル観測周波数使用によるコンティニウム成分除去法 (OVRO 手法) によって推定した場合の結果を示している。横軸 EPL は等価的に大気中水蒸気量をグループ化したものを表している。両者推定精度的には

大きな差は見られないものの、とでは縦軸右側のグループ毎残差平均を照合した場合、OVRO 手法 () が水蒸気量の変動に対して安定した残差を示している。

5. 4チャンネルコンティニウム成分 2 次曲線推定による EPL 推定精度

既に、WVR が複数観測周波数チャンネルの同時測定を行う必要があるのは、ライン成分以外にコンティニウム成分が重畳しており、このコンティニウム成分を除去する必要がある

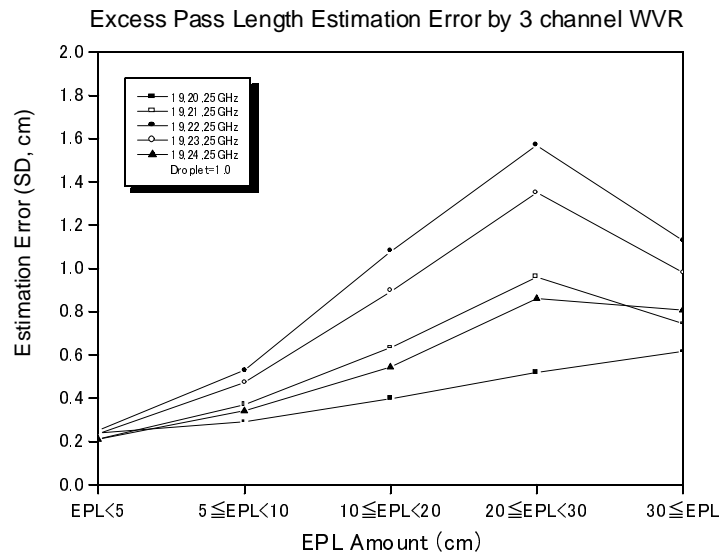


図3: 3チャンネル WVR による EPL 推定精度

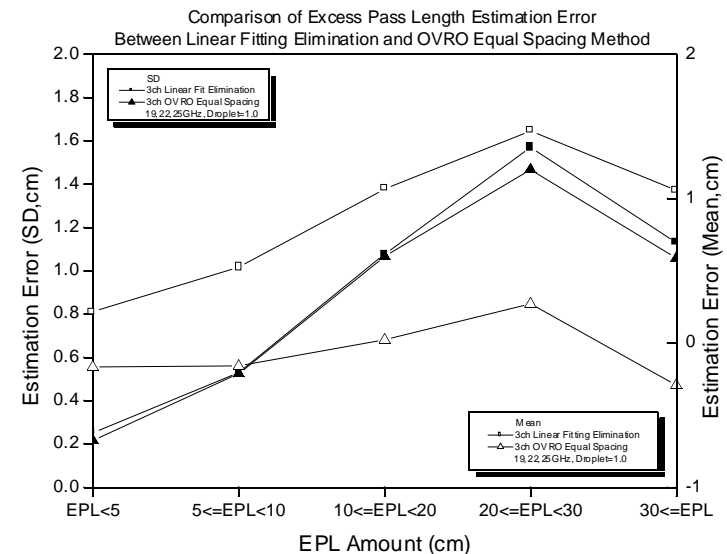


図4: 3チャンネル OVRO手法による EPL 推定精度

ことを述べた。従って、このコンティニウム成分の除去は、ほぼ2次曲線を示すコンティニウム成分を精度良く推定除去すれば良い事になる。その為に、大気中水蒸気による吸収を反映する 22.2GHz のピークを挟んで上下2チャンネルずつ、計4チャンネルによる観測から、4点によるコンティニウム成分の2次曲線推定を行い、コンティニウム自身の除去を試みた。右図に概念図を示す。が4点によるコンティニウム成分の2次曲線推定に用いた観測周波数チャンネルで、×がライン成分による大気輝度温度の周波数依存性の様子を示している。EPL 推定精度の試算結果は、残念ながら、先に図2に示した様な大気輝度温度の周波数による依存性が残り、コンティニウム成分を完全に除去するに至らなかった。

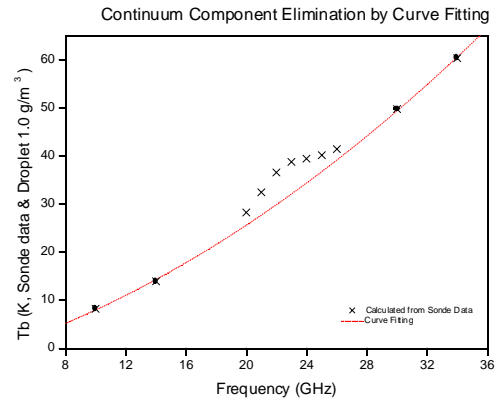


図5：4点によるコンティニウム2次曲線推定

6. 観測周波数チャンネル数の違いによる EPL 推定精度比較

観測周波数チャンネル数を1~4チャンネルとした場合のそれぞれの EPL 推定精度を試算し、結果を図6に示す。この中で推定精度が良いと思われる観測周波数チャンネルの組み合わせは、19&20&25GHz 及び 24&31GHz となっている。むやみに観測周波数チャンネル数が多くなくとも良好な EPL 推定精度が得られる事が判明した。特に、24&31GHz の組み合わせは、市販の WVR のものであり、観測周波数チャンネルの選定が熟慮されている事を窺わせる結果となった。図7に、この

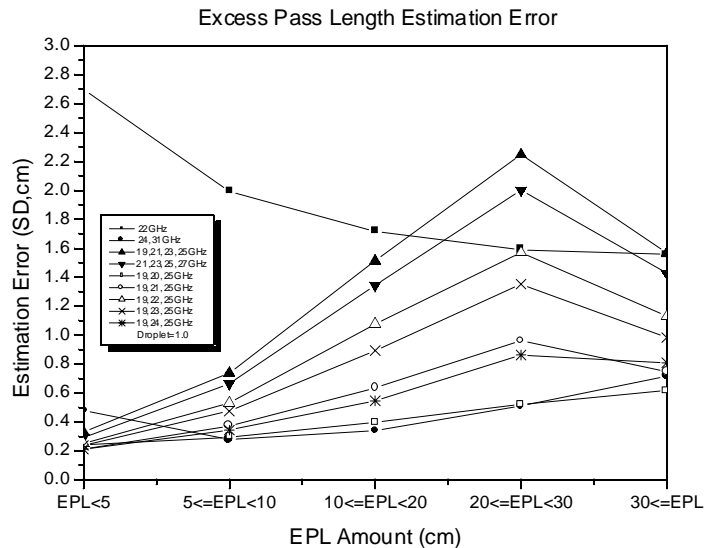


図6：チャンネル数の違いによる EPL 推定精度比較

2例について、確度的な評価を加味した結果を示す。図中、は24&31GHzの2チャンネル型WVR、は既に3図と4図に示した4チャンネル型WVRの場合である。がそれぞれの場合の確度的評価で、の方が水蒸気量の変動に対して安定した推定精度を示しているが、市販製品であるは、水蒸気変動に対してEPL推定値の確度が安定しておらず、キャリブレーションを行っても、水蒸気量の変動すれば再度キャリブレーションを繰り返す必要があり、日本のような多湿な環境下では、こまめなキャリブレーションが必須であることを窺わせている。ただし、我々

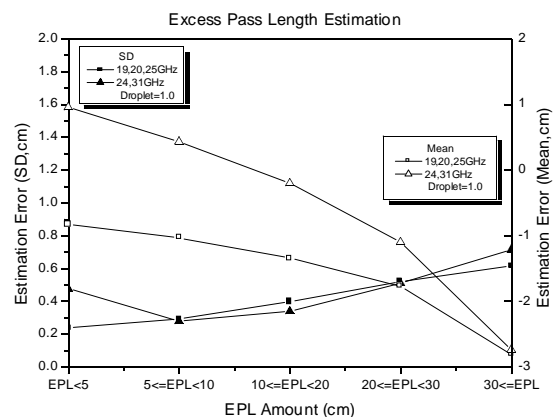


図7：EPL 推定精度比較

のシミュレーションにおいては、熱雑音は十分小さいと仮定しているため、この効果を入れると結果が変わってくることも考えられる。

7. サブミリ領域の EPL 推定精度

最近、サブミリ領域での観測に適した水蒸気が少ない場所における WVR 実験の結果が報告され始めている。筆者らがこれまで EPL 推定精度を検討した結果では、このような条件下では数 mm 程度の推定精度は得られそうである事が分かった。

今回の精度推定手法では、ゾンデデータの測定精度がそのまま EPL や大気輝度温度へ引き直され、精度推定誤差を制限していると思われる。そこで、このゾンデデータの分解能誤差起因の推定誤差の低減をはかるため、シミュレーション計算系のシステム誤差ノイズを EPL 推定精度から引き去る事を試みた。この手法を OVRO の WVR 観測手法へ適用し、サブミリ領域の EPL 推定精度が達成できるか、試算した。結果を図 8 に示す。残念

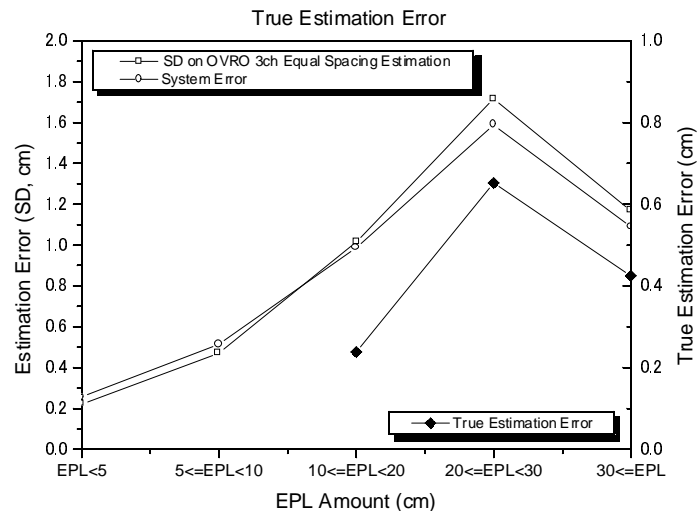


図 8: システム誤差ノイズを考慮した EPL 推定精度ながら、で示すシステム誤差ノイズとで示す EPL 推定精度が拮抗しており、真の EPL 推定精度を表すが、乾燥大気領域である EPL が 10cm 以下では値が得られない結果となっている。しかしながら、システム誤差ノイズを充分吟味すれば、図中 で示した真の EPL 推定精度は、水蒸気量が少ないサブミリ波観測サイトにおける推定精度に近い精度が得られる可能性がある事を予想させる結果となっている。

8. おわりに

WVR での観測するチャンネル数や周波数の組み合わせと EPL 推定精度との関係をゾンデデータを用いたシミュレーション計算によって検討し、以下のことが判明した。

1. EPL の Estimation Error は大気の状態に大きく依存しているため、同じラジオメータを使っても使用場所で大きく異なる。
2. True Estimation Error から見ると、水沢でも大気の状態が良い時には 1mm 以下で EPL が測れそうである。(EPL < 20cm の場合)
3. 大気が Humid であっても、状態があまり変化しなければ EPL の Estimation Error はむしろ良くなる。(30cm EPL の場合)

参考文献

[1] A.R. Thompson, J.M. Moran and G.W. Swenson, Jr, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, Krieger publishing company, pp.426-439, 1998.
 [2] Hans J. Liebe, An updated model for millimeter wave propagation in moist air, Radio Science, Vol 20, No.5, pp.1069-1089, 1985.
 [3] Kevin B. Marvel and David P. Woody, Phase correction at millimeter wavelengths using observations of water vapor at 22GHz.