

2-3 地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定手法の研究開発

2-3 Water Vapor Estimation using Digital Terrestrial Broadcasting Waves

川村誠治 花土 弘 太田弘毅

Seiji KAWANURA, Hiroshi HANADO, and Hiroki OHTA

豪雨災害の防災・減災を目指し、地上デジタル放送波を用いて電波の伝搬経路上の水蒸気量を推定する技術を開発している。ピコ秒の精度で電波の伝搬遅延変動を計測することで、水蒸気量の変動を知ることができる。手法の原理・方法、観測装置やその展開状況を紹介する。

A method of estimating water vapor using digital terrestrial broadcasting waves is proposed for preventing or mitigating heavy rainfall disasters. Measuring propagation delay of radio waves in picoseconds order enables us to derive water vapor information. Principles, methods, developed instruments, and the recent status of our observation are introduced.

1 まえがき

近年都市部で頻発する局地的大雨(通称ゲリラ豪雨)などの時空間スケールの小さな気象現象は、孤立した積乱雲の急激な生成・発達により引き起こされる。従来のレーダー観測ではとらえることが困難だったこのような現象が、フェーズドアレイ気象レーダー(PAWR)の登場により可視化できるようになってきた。PAWRは半径60 kmの範囲の雨を30秒ごとに三次元観測することができる。さらに、2018年3月から埼玉大学で観測が開始されたマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー(MP-PAWR)は、観測の高速性を保ちつつ偏波の情報を使ってより定量的な降雨観測を実現している。このようなフェーズドアレイ気象レーダーを用いることで、上空で急発達した降水粒子が落下に要する5~10分後には地上のどのあたりにどの程度の降水をもたらすか、といった短時間の予測が可能になってきた。

しかし、防災・減災のための対応が可能となるような長いリードタイムを取った予測(20分~数時間先の予測)の精度はいまだ十分とは言えない。このような長い予測の精度向上には数値予報モデルが重要であり、その予測精度向上にはモデルそのものの改良に加えて、より多くの観測データを取り込む(データ同化する)ことが必要となってくる。その中でも特に近年期待されているのが水蒸気量のデータ同化である。水蒸気は雨の元となる気体としての水であり、この水蒸気の動きを早い段階から連続して監視することで、より精度の高い降雨予測につながると期待されている。本稿で

は、NICTが開発し、現在首都圏を中心に実証実験を実施している地上デジタル放送波(地デジ放送波)を用いた水蒸気量推定技術を紹介する。

2 水蒸気量推定の原理

降雨レーダーは、電波を送信して降水粒子(雨粒、水粒等)からの散乱を受信する。一方、水蒸気は粒子ではなく気体なので電波を散乱しない。このため水蒸気量観測では送信波の散乱を利用するというレーダー方式が使えない。そこで本研究で利用するのは、電波の伝搬遅延である。電波は大気中の水蒸気量が増加すると伝搬速度が遅くなり、伝搬遅延を生じる。伝搬遅延が生じるということは、実効的に伝搬経路長が伸びることと等価である。この遅延量変化(若しくは実効伝搬経路長変化)を測定することで、伝搬経路上積算の水蒸気量の変化を知ることができる。

距離1 kmの伝搬を考えた場合、その空間の湿度が1%上昇するときの電波の遅延量は、3ピコ秒(3×10^{-12} 秒)程度である(気温25度、1気圧において)。これは1 kmの伝搬経路長が約1 mm伸びたのと等価である。つまり、伝搬遅延をピコ秒(10^{-12} 秒)の精度(距離にしてmmの精度)で計測することで水蒸気量の観測が可能となる。この僅かな遅延量測定を、地デジ放送の搬送波位相を測定することで実現する。

位置関係が固定されている送受信地点間を決まった周波数(波長)の放送波が伝搬する場合、ある一定の周期でサンプリングされる受信電波の位相は一定になるはずである。水蒸気量変化によって実効伝搬経路長

2 地上レーダーによる気象現象の観測

が伸び縮みするとその分だけ位相が回転するため、位相変化を測定することで実行伝搬経路長変化(遅延量変化)が分かる、というのが基本的な考え方である。ただし、実際に測定される位相変化には、水蒸気量変化によるもの以外に、放送局と受信機それぞれに用いられている局部発振器(基準クロック)の位相雑音も含まれる。通常は考慮する必要がないほど小さな位相雑音であるが、ピコ秒の精度を考える場合にはその影響は大きい。位相雑音の変動は水蒸気量変化による位相変動に対して2~3桁程度も大きいいため、これを打ち消さない限り水蒸気量変化が見えてこない。

3 水蒸気量推定の方法

3.1 観測配置

位相雑音を相殺するために我々が提案している2つの観測配置(“同期法”と“反射法”)を図1に示す[1]。単一の測定点で単純な位相測定をしているだけでは、放送局と測定点の局部発振器の位相雑音に埋もれて水蒸気量変化が見えてこない。図1(a)の同期法では、電波塔と測定点を結ぶ直線上にもう一点測定点を設け、同じ測定をする。双方の測定量の差を取ることで放送局側の位相雑音が相殺され、測定点A-B間の伝搬遅延と各測定点の局部発振器の位相雑音差が残る。2つの測定点の局部発振器をピコ秒の精度で同期させて後者を取り除くことができれば、A-B間の伝搬遅延変動が測定できるということになる。光ファイバーを用いれば離れた場所の局部発振器をピコ秒の精度で同期することができるが、多地点に測定点を展開した場合に局部発振器の同期のために光ファイバー網を構築するのはコストがかかるため、より安価な方法を検討しているところである。図1(b)に示す反射法は局部発振器の同期無しで伝搬遅延を測定できる手法であり、

現在この手法での実証実験を行っている。反射法では測定点は一点で、その代りに直達波以外に遠くの建物等からの反射波を利用する。直達波も反射波もその位相変化には水蒸気量変化成分以外に放送局と測定点の局部発振器の位相雑音も乗ってくるが、それらの位相雑音は全く同じものなので差を取ることで相殺され、測定点と反射体との間の往復の伝搬遅延が精度良く測定できる。

3.2 観測装置

我々が開発し、現在展開を進めている観測装置の写真を図2に示す。主要な構成要素はPCとソフトウェア無線用デバイス(USRP-N210)である。USRP-N210には小型GPSボード(GPS同期の水晶発振器)が入っており、これを局部発振器として利用している。水晶発振器の位相雑音は比較的大きいが、反射法を使えばきれいに相殺される。システムの監視やデータ集約には携帯回線を利用し、そのためのルータなども合わせて一式をキャビネット(500 × 400 × 250 mm)に格納している。100 VのAC電源を供給するだけで運用が可能である。

市販の地デジ用アンテナで受信された信号は必要に応じて市販の地デジ用ブースターで増幅された後USRP-N210に入力される。USRP-N210内でAD変換・IQ検波された信号はPCの中でリアルタイム処理される。1台のUSRP-N210で2チャンネルの受信が可能であり、写真の装置では2台のUSRP-N210をMIMOケーブルで接続して同期を取り、合計4チャンネルの同時受信が可能となっている。

3.3 地上デジタル放送波を用いた伝搬遅延計測

現在日本で用いられている地デジ変調方式(ISDB-T)では、地デジ信号は1局あたり約6 MHzの

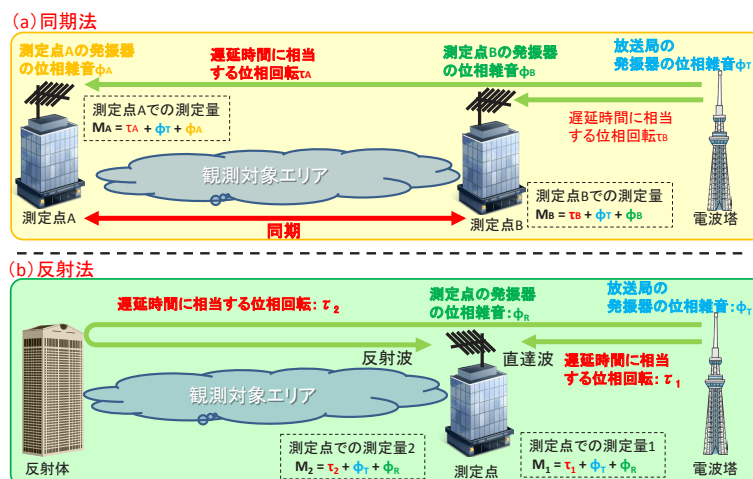


図1 地デジ放送波を用いて水蒸気量を推定するための2つの観測配置

周波数帯域を有しており、帯域中に 5,617 本のキャリアが存在している。各キャリアは長さ 1.134 ms の“シンボル”を基本単位として 64 QAM のフルセグ映像・音声信号や QPSK のワンセグ信号などの情報伝達を担っている。このシンボルには時間・周波数方向に周期的に BPSK のパイロット信号 (SP 信号) が埋め込まれており、この SP 信号だけを抜き出すことで遅延プロファイルが導出される。遅延プロファイルを用いることで、電波塔から測定点まで様々な伝搬経路 (マル

チパス) で伝搬する電波を遅延時間ごとに分離することができる。遅延プロファイル上で分離された各電波成分 (直達波や反射波) の位相を測定し、その変化から伝搬遅延変動を算出する。

4 シンボルで 1 つの遅延プロファイルが算出できるため、原理的に約 4.5 ms ごとに伝搬遅延計測が可能である。現在は 1 秒間の平均値として伝搬遅延をリアルタイム算出している。

4 観測結果の例

NICT で実施している観測の位置関係を図 3 に示す。東京スカイツリーから西方約 29 km に位置する R0 が測定点である NICT 小金井本部で、R1 ~ R3 はそれぞれ遅延プロファイルからの遅延時間や反射波の到来方向から推定される反射体の位置である。R0 において、直達波に加えて 3 つの反射波、合計 4 波の信号を受信することができる。これらの信号の位相差を算出することで、図 3 (b) に示す 3 つのエリアそれぞれの伝搬遅延を導出することができる。得られた各エリアの伝搬遅延変動の一例 (2018 年 7 月 23・24 日の測定例) を図 4 に示す。

図 4 (a) では各エリアの伝搬遅延を 1 km あたりの遅延量に換算してプロットしている (見やすくするためにエリア 2、エリア 3 のデータにはそれぞれ 50 ピコ秒、100 ピコ秒のオフセットを加えている)。エリア 1 のライン (赤実線) に重ねている黒実線は、NICT 本部 (小金井) における一地点観測で得られた地上気温、気圧、湿度から理論的に算出した 1 km あたりの伝搬遅延である。一地点の地上気象観測値を 1 km の間一定と仮定して算出している。一地点観測から算出された計算値と 1 km の積算である地デジ観測値は観測エリアが異なるため必ずしも一致する必要はないのだが、それでも両者は比較的良い一致を示しており、



図 2 ソフトウェア無線の技術で開発した観測装置

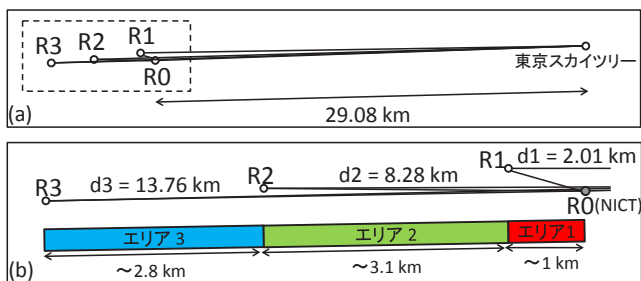


図 3 NICT で実施している水蒸気量観測の位置関係

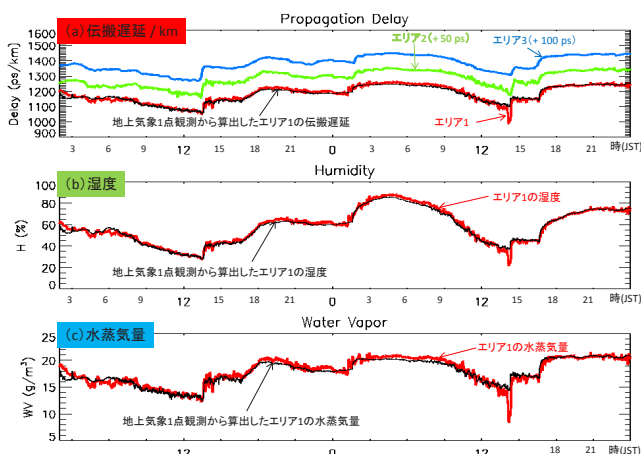


図 4 地デジ放送波を用いた水蒸気量観測結果の一例 (2018 年 7 月 23 日 ~ 24 日)

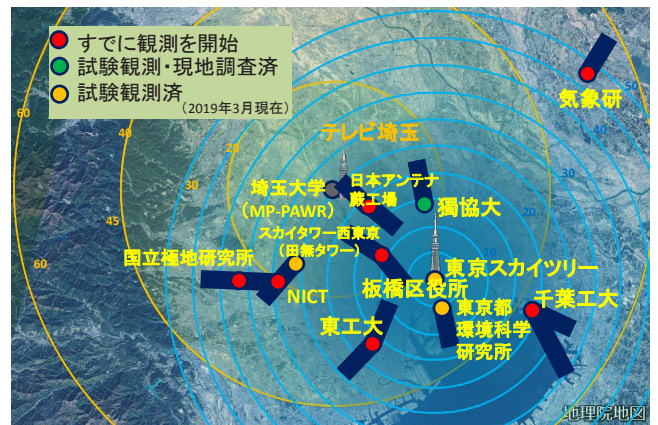


図 5 首都圏における観測展開の現状

地デジを用いた観測が妥当な気象観測となっていることを示している。図4(b)及び(c)は地デジにより得られた伝搬遅延から、NICTの地上気温・気圧を用いて換算した湿度及び水蒸気量変化である。23日の13時30分頃や24日の16時30分頃に伝搬遅延や水蒸気量がステップ状に増加しているが、NICT本部(小金井)で連続観測しているウィンドプロファイラレーダー(WPR)によるとこの時間に風向が南よりに変化しており、それに伴って湿った空気が浸入してきたことに対応していると考えられる。

5 観測展開状況

埼玉大学で運用されている最新の気象レーダーMP-PAWRの観測範囲と重なるように、反射法を用いた地デジ波による水蒸気量観測網の展開を進めている。図5に示すのは現在の展開状況である(2019年5月現在8地点)。基本的には東京スカイツリーからの地デジ放送波を利用するが、観測点によってはテレビ埼玉、テレビ神奈川、千葉テレビなどの東京スカイツリーと異なる電波塔からの地デジ放送波も受信可能なため、これらの場所では1地点のみの測定で複数の基線を用いた観測が可能になる。現在、多地点展開で面的に水蒸気量変動を把握し、そのデータを気象予報に用いた場合の効果の検証を行っているところである。

6 防災・減災を目指して

現在の気象予報は、計算機上で様々な物理過程を取り入れた数値予報モデルを用いて時間発展を計算することで行われている。数値予報モデルを実際の状況に近付けるためになるべく多くの観測データを数値予報モデルへ取り込む(データ同化する)ことが望ましい。本手法で観測された水蒸気量もデータ同化に用いて、数値予報モデルの予測精度向上につなげることを目指している。現在地デジ観測のデータ同化実験を進めており、一地点の観測値を用いるだけでも降雨予測精度の改善が見られることが分かってきている。ゲリラ豪雨などの局所的な現象では地表面付近の水蒸気の振る舞いが重要と言われているが、本手法の観測対象は正にその地表面付近の水蒸気量である。本手法では高さ方向の情報は得られないため、鉛直方向に水蒸気量を測定するGPS可降水量やマイクロ波放射計、水蒸気ライダーなどと合わせて気象予測の精度向上に寄与したいと考えている。防災・減災への対応には、少なくとも20分以上のリードタイムを取った予測が必要と言われる。今後多地点観測のデータ同化を進め、20分から数時間先のゲリラ豪雨等の予測精度向上を

目指したい。

7 おわりに

本手法は地デジ放送波を受信するだけでよい(送信は不要な)ため、無線局免許等が不要で、装置も比較的小型・安価に製作できる。受信装置としてアンテナやブースターなど安価な汎用品が利用できることも地デジ特有のメリットである。今後は、データ同化実験などを踏まえながらさらに観測地点を増やしていく予定である。現在用いている反射法では反射体に依存する部分が大きく観測配置の制約が大きいが、図1(a)に示す同期法が確立すれば、爆発的に観測地点数を増やすことも可能である。現在装置の小型・低消費電力化を目指し、図2に示した観測システム(プロトタイプ)のソフトウェア処理(PCとUSRP-N210の部分)をFPGAに置き換えた汎用モデルの開発も進めている。

本手法のように既存の電波を副次利用する技術は、電波資源の有効利用でもある。既存電波の散乱を利用したパッシブレーダーの開発なども視野に入れて研究開発を進めていきたい。

謝辞

本研究の一部は、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(2)豪雨・竜巻予測技術の研究開発「マルチパラメータフェーズドアレイレーダ等の開発・活用による豪雨・竜巻予測情報の高度化と利活用に関する研究」、SIP2(戦略的イノベーション創造プログラム第2期)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」V. 線状降水帯観測・予測システム開発「線状降水帯の早期発生及び発達予測情報の高度化と利活用に関する研究」、科研費「水蒸気稠密観測システムの構築による首都圏シビアストームの機構解明」、及び科研費「ストームジェネシスをとらえるための先端フィールド観測と豪雨災害軽減に向けた総合研究」によってサポートされている。

【参考文献】

- 1 S. Kawamura, et al., Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves, Radio Sci., 52, 2017. doi:10.1002/2016RS006191.



川村誠治 (かわむら せいじ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士 (情報学)
レーダーリモートセンシング



花土 弘 (はなど ひろし)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
理学修士
マイクロ波リモートセンシング



太田弘毅 (おおた ひろき)

電磁波研究所
電磁環境研究室
主任研究員
電波伝搬、雑音計測