

バイスタティック・ドップラーレーダー・ネットワーク

Bistatic Doppler Radar Network

1. はじめに

通常のレーダーは送信機と受信機が同じ場所にあることからモノスタティックレーダーと呼ばれる。それに対して、送信機と受信機の間距離を置いて設置するものをバイスタティックレーダーと呼ぶ。バイスタティックレーダーは、1970年代から様々な目的の実験に使われてきたが (Doviak and Zrníc, 1993), ここで紹介するバイスタティック・ドップラーレーダー・ネットワークとは、1台の気象ドップラーレーダー(主レーダー)と幾つかのリモート受信局によって、3次元風速場を測定する為の複数台のドップラーレーダー観測網を実現するものである (Wurman *et al.*, 1993)。

バイスタティック・ネットワークでは、主レーダーだけが電波を送信し、リモート受信局では、目標物(降雨)からの散乱を非走査型の広い角度特性を持つアンテナで受信する。この時、受信局では、モノスタティックレーダーが測定する後方散乱ではなく、様々な角度の側方散乱 (obliquely scatter) を測定することになる。ところが、多くの気象レーダーで採用されている水平偏波の場合、散乱断面積の角度特性により、多くの観測範囲において十分なバイスタティック受信強度が得られない。しかしながら、主レーダーを垂直偏波とすることによって、散乱角による受信強度の低下は、ほとんどのデュアルドップラー解析範囲内 (特に低仰角の観測) では問題にならない。

ところで、受信局でドップラー速度を測定するためには、主レーダーが送信する電波の位相およびパルスタイミングを知らなければならない。その技術的な方法については Wurman *et al.* (1994a) に詳しく述べられており、GPS (Global Positioning System) 信号による同期システムと、時刻やアンテナ角度等の情報を送るための通信回線 (電話回線あるいは無線リンク) が使われる。

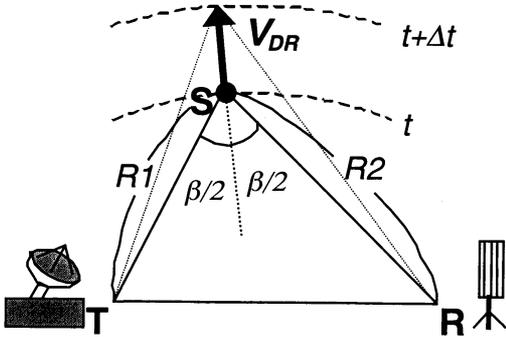
2. 長所と短所

バイスタティック・ネットワークの長所は、従来のモノスタティック・ドップラーレーダーを使ったものに比べて少ない費用で簡単に複数台のドップラー観測網を構築できることと、すべてのデータが主レーダーの距離分解能とビーム幅で決まるサンプリングボリューム内において同時に観測されることである。すべてのリモート受信局で測定されるドップラー速度が同じボリューム内で同時に観測されるということは、モノスタティック・レーダー2台による従来のデュアルドップラー解析で避けることができなかつた時間定常性の仮定が全く必要ないということであり、急速に変化する対流雲内の風速場も正確に求めることができることを意味する。

反対に短所は、バイスタティック受信局において、弱いエコーに対する受信強度が十分に得られないことである。これは、受信局側で、主レーダーのビーム方向に沿ったデータを瞬時に観測するために、広い方位角特性を持つアンテナを使わなければいけないことに起因する。ただし、エコー強度分布は主レーダーで観測されるので、受信局ではドップラー速度が測定できる最小受信強度だけを考えるだけで良い。逆に、非常に強いエコーが存在する場合、広い角度特性を持つ受信アンテナは、主レーダーのアンテナサイドローブや多重散乱の影響を受けやすい (Wurman, *et al.*, 1993)。しかし、受信アンテナパターンで補正されたバイスタティック・エコー強度と主レーダーで観測されたエコー強度を比較することによって、サイドローブや多重散乱による混入エコーを、ある程度除去することは可能である。これらの受信強度に関する問題を避ける最も効果的な方法は、安価なリモート受信局を数多く設置して、それらのデータを変分法などにより効果的に合成することである。

3. バイスタティック幾何学と風速場の算出精度

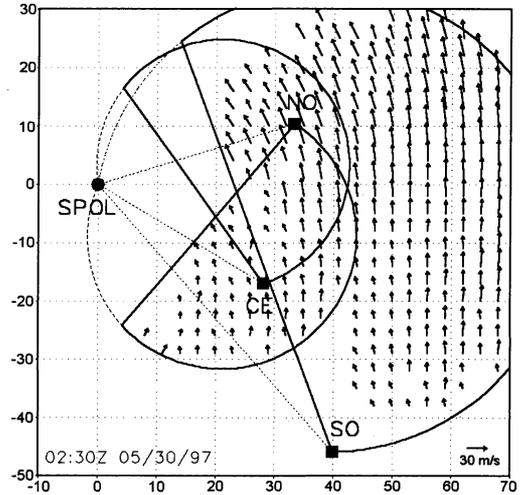
バイスタティックレーダーで測定されるドップラー



第1図 バイスタティックレーダーを構成する送信機 (T) - 目標物 (S) - 受信機 (R) の幾何学的配置と、受信機で測定されるドップラー速度ベクトル (V_{DR}) を示す模式図。 β は T-S と R-S の成す角度で、R1, R2 はそれぞれ T-S, R-S の距離である。破線は、送信された電波が目標物で散乱され受信機に到達する等時刻面 ($t = (R1 + R2) / C$, C は光速) であり、T と R を焦点とする楕円面となる。 V_{DR} はこの楕円面に直交する方向、すなわち $\beta/2$ 方向の速度ベクトルとなる。

速度は、通常のレーダーとは異なり、受信局に対する視線方向の速度成分ではない。第1図に示すように、測定されるドップラー速度は、連続する2つのパルスの経路長の差に比例するので、経路長 ($R = R1 + R2$) の単位時間あたりの変化率 (傾き) $grad R$ を考えなければならない。ここで、バイスタティックレーダーの単位速度に相当する $grad R$ は、主レーダーと受信局を焦点とする楕円である等時刻面に直交する方向のベクトルであり、その角度は $\beta/2$ 、大きさは $2 \times \cos(\beta/2)$ となる。ここで β は、目標物を挟む主レーダと受信局からの角度である。同様に考えると、モノスタティックレーダーの単位ドップラー速度 (経路長 $(R1 + R1)$ の変化率) は2であるので、バイスタティックレーダーで観測される最小ドップラー速度は、その $\cos(\beta/2)$ 倍になる。この速度分解能の低下とは反対に、観測できる最大のドップラー速度 (折り返し速度) は大きくなる。また、距離分解能は、 $grad R$ の主レーダー視線方向成分 ($R1$ の方向) に比例し、 $2\tau \times \cos^2(\beta/2)$, τ はパルス幅、で表される。今、送信機と受信機を結ぶベースライン上にある目標物からの散乱を考えると、それらはすべて同時刻に受信局に到達することから想像されるように、ベースライン上では距離分解能も速度分解能も不定 (無限大) となる。

ところで、主レーダーおよび受信局で測定される2



第2図 バイスタティック・ドップラーレーダー・ネットワークで観測された仰角0.5°のアンテナ走査面上における水平風速ベクトルの分布。SPOLが主レーダー、NO, CE, SOが受信局で、 $\beta/2 \geq 25^\circ$ (本解析におけるしきい値) の領域を示す円弧とバイスタティック・アンテナの観測有効方位角を実線で示す。これらの実線で囲まれた領域が、それぞれの組み合わせによるデュアルドップラー解析範囲である。解析範囲内で風速ベクトルが示されていない領域は、エコー強度が弱い場所である。

つのドップラー速度ベクトルの角度差が $\beta/2$ であることは、デュアルドップラーのベクトル合成がもっとも精度良く行える領域 ($\beta/2$ が 90° に近い領域) が、速度分解能も距離分解能も悪いベースライン近傍にあることを意味する。しかし、モノスタティック・デュアルドップラーの場合でも、ベースライン付近は精度良く風速ベクトルが算出できない領域なので、これが直ちにバイスタティック・ネットワークの欠点になる訳ではない。ただし、2つの速度ベクトルの角度差が、モノスタティックの場合は β 、バイスタティックの場合は $\beta/2$ であるということは重要な違いであり、算出される風速ベクトルの精度の低下、あるいはデュアルドップラー解析可能範囲が狭くなることを示唆する。第2図は、米国カンザス州で行われたバイスタティック・ネットワークの実験で得られた結果であり、1台のレーダーと3台の受信局で観測されたドップラー速度から求めた水平風速分布である (Satoh and Wurman, 1999)。デュアルドップラー解析範囲が重なる範囲では、算出される風速精度を表す $\sin^2(\beta/2)$ の重みを付

けて平均した風速ベクトルを表示してある。

4. 実用化に際して

ここまで述べてきたように、バイスタティック・ドップラー・ネットワークは、受信強度や算出される風速精度に若干の制限があるものの、総合的には従来の複数台のドップラーレーダー観測に取って代わる性能を有すると考えられる。特に、従来の複数台のドップラーレーダー観測では、電波干渉を防ぐためにレーダーの数だけ異なる周波数が必要だったのに対して、バイスタティック・ネットワークでは必要な周波数が1つだけであることは、実際の導入を容易にするものである。主レーダーについては、コヒーレントな送信波を出すクライストロン型の方が同期システムが簡単になるが、日本で多く使われているマグネトロン型レーダーの場合でも、送信パルスの位相情報を通信回線で相互にやり取りすることによって、受信局におけるドップラー信号の検知が可能である。既存の気象レーダーをバイスタティック化する為には、GPS同期システムの導入と、一次放射器と導波管の取り付け変更による垂直偏波化が必要である。一方、受信局については、C-bandの場合1.5~2mの高さのアンテナが設置できる見通しの良い場所とパソコン1台に収まる受信機等が設置できるわずかなスペース、および電源と通信回線が確保できれば良い。また、費用についても、既存のドップラーレーダーの改造費と3~5台の受信局の製造費を合わせたとしても、新しいドップラーレーダー1台を作る費用の数分の一程度で済むはずである。

1999年現在、カナダのMcGill大学においては、リアルタイムデータ処理を含むバイスタティック・ネットワークが定常的に運用されており(Protat and Zawadzki, 1999)、ドイツのDLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)においても観測実験が始まった(Hagen *et al.*, 1999)。アメリカでも、NCAR(National Center for Atmospheric Research)とオクラホマ大による多くの実験が繰り返されており、実

用化に向けた研究が行われている。日本においても、いくつかの研究機関が、バイスタティック・ネットワークの研究開発を計画している。これまで日本では、周波数割り当ての問題や設置場所の問題により、短期間の特別観測実験以外の複数台のドップラーレーダー観測は困難であったが、バイスタティック・ドップラー・ネットワークは、将来のルーチン観測システムとしても有望な新技術であると考えられる。

参考文献

- Doviak, R. J. and D. S. Zrnic, 1993: Doppler Radar and Weather Observations. (2nd ed.) Academic Press. 562pp.
- Hagen, M., P. Meischner, J. Wurman, M. Randall and C. Burghart, 1999: A C-band bistatic Doppler radar system at DLR Oberpfaffenhofen. Proc. of the 29th Conf. on Radar Meteor., Montreal, 813-814.
- Protat, A. and I. Zawadzki, 1999: A variational method for real-time retrieval of three-dimensional wind field from multiple-Doppler bistatic radar network data. J. of Atmos. and Oceanic Tech., 16, 432-449
- Satoh, S. and J. Wurman, 1999: Accuracy of composite wind fields derived from a bistatic multiple-Doppler radar network. Proc. of the 29th Conf. on Radar Meteor., Montreal, 221-224.
- Wurman, J., S. Heckman and D. Boccippio, 1993: A bistatic multiple-Doppler radar network. J. Appl. Meteor., 32, 1802-1814.
- Wurman, J., M. Randall, C. L. Frush, E. Loew and C. L. Holloway, 1994a: Design of a bistatic dual-Doppler radar for retrieving vector winds using one transmitter and a remote low-gain passive receiver. Proc. of the IEEE., 82, 1861-1872.
- Wurman, J. 1994b: Vector winds from a single-transmitter bistatic dual-Doppler radar network. Bull. Amer. Meteor. Soc., 75, 983-994.

(通信総合研究所/オクラホマ大学 佐藤晋介)