

二周波降水レーダアルゴリズムに求められる表面参照法の精度

東京大学 生産技術研究所
(独)情報通信研究機構
東京大学 生産技術研究所

○瀬戸 心太
井口 俊夫
沖 大幹

1. はじめに

TRMM(熱帯降雨観測衛星)に搭載されている PR(降雨レーダ)の後継センサとして、GPM(全球降水観測計画)の主衛星に搭載される DPR(二周波降水レーダ)が準備中である。PR が 13.8GHz の一周波のみの観測であったのに対して、DPR はその名が示すように、13.6GHz(Ku 帯)と 35.5GHz(Ka 帯)の二周波で観測を行う。DPR は 2013 年の運用開始に向けて、ハードウェア・ソフトウェアの両面の開発が進んでいる。ソフトウェアのうち、レーダ観測値から降雨強度を推定するための DPR L2 アルゴリズム(以下、DPR アルゴリズム)の開発は、日米共同で進められている。本研究では、DPR アルゴリズムにおける表面参照法の役割について、定量的な検討結果を示す。

2. 関連研究

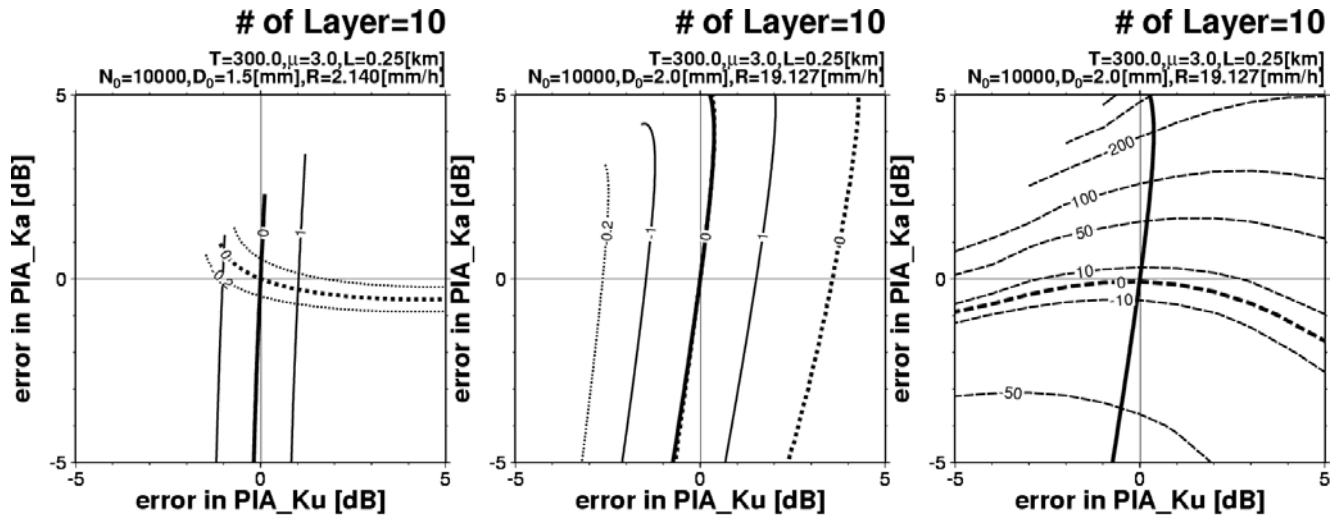
DPR では、各レンジにおいて観測量(観測レーダ反射因子、 Z_m で表す)が 2 つ得られることから、式(1)で表す雨滴粒径分布の 2 つのパラメータ($N_0[\text{mm}^{-1}\mu\text{m}^{-3}]$ と $D_0[\text{mm}]$)を直接推定することが期待される。

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp[-(3.67 + \mu)D/D_0] \quad (1)$$

D は粒径[mm], $N(D)$ は粒子数密度[$\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$]であり、 μ は通常既知として扱われる雨滴粒径分布パラメータである。例えば、Mardiana et al.(2004)は、レンジ数 n の場合に対して、合計 $2n$ 個の Z_m から、各レンジの(N_0, D_0)合計 $2n$ 個の未知数を求める非線形連立方程式の解法を提案した。この解法を、本研究では繰返し後退法と呼ぶ。これは、Meneghini et al.(1992)などのように表面参照法を用いてパス積分減衰量(PIA)を推定してからリトリーバルする後退法と呼ばれる解法に対して、PIA を任意に仮定してリトリーバルを行い、リトリーバルした結果が最初に仮定した PIA と一致するまで繰返し計算を行う方法である。必ずしも PIA を正確に推定できない表面参照法に依存しないという点で繰返し後退法は注目されるが、その後の研究(例えば、Rose et al. 2005; Adhikari et al. 2007)によると、ある程度以上強い雨に対して、繰返し後退法は正しい解を与えないことが報告されている。瀬戸ほか(2009)は、繰返し後退法はレーダから観測最上端までの減衰量(dBA^* とする)に関する上部境界条件を拘束し、PIA に関する下部境界条件を拘束しないという点で前進法と等価であり、客観的には 2^n 個の解が存在するため、必ずしも正しい解を与えられないことを示した。したがって、DPR アルゴリズムにおいて、表面参照法が必要であることが強く示唆された。本研究では、瀬戸ほか(2009)を発展させて、表面参照法の精度と降雨強度推定値の関係について考察する。そのための設定を、次節で示す。

3. 設定

DPR により、鉛直下向きに降水が観測されている。鉛直方向の解像度(レンジの幅)は $L=250[\text{m}]$ として、レンジの数は n 個、すなわち地表面から $n \times L[\text{m}]$ の高度まで観測されている。レンジ内では、雨粒子が一様に分布しており、その雨滴粒径分布は式(1)のガンマ分布に従う。パラメータのうち、 N_0 と D_0 は未知であるが、 μ は既知であるとする。なお、レンジごとに(N_0, D_0)は異なって構わないが、以下ではすべてのレンジで同じ場合のみを扱っている(当然ながら、リトリーバルにおいてそのことは仮定しない)。雨粒子以外による散乱・減衰は発生せず、観測最上端より上では一切の減衰が発生しないものとする($\text{dBA}^*=0$)。 Z_m の観測誤差もないものとする。雨滴は球形であり、誘電率の計算に用いる温度は高度に依存せず $300[\text{K}]$ とした。以上の設定のもとで、後退法を適用する。その際に用いる表面参照法の誤差の影響について考察する。



(図の説明、左から)

図 1 PIA の推定誤差(横軸が Ku 帯, 縦軸が Ka 帯)と, dBA*(等値線, 実線が Ku 帯, 点線が Ka 帯, 太い線が dBA*=0dB, 細い線はそのほかの等値線)の関係. $D_0=1.5\text{mm}$ の場合.

図 2 図 1 と同じ. ただし, $D_0=2.0\text{mm}$ の場合. 原点を通る太い実線に, 太い点線がほとんど重なっている.

図 3 図 2 の場合の地表面付近降雨強度推定値の相対誤差[%]. 図 2 のうち太い実線のみを再表示.

4. 表面参照法に求められる精度

比較的弱い雨の場合($N_0=10000$, $D_0=1.5$, $\mu=3$, 降雨強度= 2.140mm h^{-1} , $n=10$)に対して, 表面参照法による PIA 推定値の誤差と, dBA*のリトリーバル値の関係を図 1 に示す. この場合, 両周波数の PIA がともに正しく与えられた場合のみ, 両周波数の dBA*がともに 0 となっている. 2 節で用いた表現で言い換えると, 下部境界条件が正しく与えられた場合のみ, 上部境界条件が満たされる. こうした場合には, 繰返し後退法のように上部境界条件のみを用いる方法でも正しい解を与えることが多い. しかし, 図 2 に示すような比較的強い雨の場合($N_0=10000$, $D_0=2.0$, $\mu=3$, 降雨強度= 19.127mm h^{-1} , $n=10$)には, 下部境界条件が満たされなくても, 上部境界条件がほとんど満たされることがある(図 2 における太い実線. 太い点線がほとんど重なっている). このような場合に対しては, 繰返し後退法では正しい解を与えることが期待できない. 後退法において, 必ずしも両周波数の PIA 推定値は必要ではなく, どちらか一方が良いことが図 2 からは示唆される. 図 3 には, 図 2 のケースについて, 最下端レンジ(地表面付近)における降雨強度の相対誤差[%]を示している. 解の候補となる太い実線上で, 相対誤差が 10%である点は, Ku 帯(Ka 帯)の PIA の誤差が 0.045dB(0.418dB)に相当する. また, 同じく相対誤差が 50%である点は, Ku 帯(Ka 帯)の PIA の誤差が 0.183dB(1.697dB)に相当する. D_0 , N_0 , μ を様々に変えて同様な検討を行った. 相対誤差を 50%に収めるためには, $20\sim 50\text{mm h}^{-1}$ 程度までの雨の場合, Ku 帯(Ka 帯)の PIA に $0.1\sim 0.2\text{dB}(1\sim 2\text{dB})$ の精度が求められる. それよりも強い雨に対しては, 約 1dB (約 4dB) の精度が求められる.

5. おわりに

PR での経験から, Ku 帯に求められる推定精度の実現は容易ではないと思われる. 一方で, 単純な絶対値の比較では Ka 帯に求められる精度は Ku 帯に比べ 10 倍近く緩いため, DPR では, Ka 帯の表面参照法の開発が重要になると考えられる. なお, Seto and Iguchi(2007)で指摘しているような地表面状態変化による表面参照法のバイアスを緩和するためには, Ka 帯と Ku 帯の PIA の差を用いる方法も有望であり, 今後の開発計画に含めたい.

謝辞 本研究は, 宇宙航空研究開発機構との TRMM データ利用公募型共同研究(代表: 瀬戸心太)の成果の一部である.

参考文献(一部) 瀬戸ほか, 2009: 土木学会水工学論文集, Vol.53, pp373-378.

Mardiana et al., 2004: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.42, pp2214-2225.

Adhikari et al., 2007: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.45, pp2612-2618.

Seto and Iguchi, 2009: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 24, pp1693-1709.

キーワード 二周波降水レーダ(DPR), 表面参照法(SRT), 雨滴粒径分布(DSD), GPM 計画, 非線形連立方程式