

衛星搭載簡易型降雨レーダのシステム設計

System Design of a Satelliteborne Simple Type Precipitation Radar

○大利 達也[†] 岡本 謙一[†] 重 尚一[†]

[†]大阪府立大学 大学院 工学研究科 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号

E-mail: † {ootoshi, okamoto, shige}@aero.osakafu-u.ac.jp

1. 研究目的

現在運用中の熱帯降雨観測衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission) 搭載の降雨レーダは、128 個の送受信素子などからなるアンテナビームを電子的に走査する Active Phased Array 方式を採用しているが、重量が約 465kg もあり非常に重くなるという問題点がある。そこで、本研究では、高速機械走査型のリフレクタアンテナを用いる小型軽量の降雨レーダシステムの設計を行い、雲解像モデルなどの降雨モデルを用いて宇宙からの降雨観測をシミュレーションし、宇宙機搭載の新しい小型軽量の降雨レーダシステムの設計仕様を固めることを目的としている。多くの衛星に搭載可能である小型軽量の降雨レーダが提案されれば、宇宙からのレーダを用いた降雨観測の機会が増え、気候変動や異常気象と深い関わりを有する地球的規模の降雨分布とその変動が精度よく観測されるものと考えられる。

2. 降雨レーダシステムの設計

2.1 コニカルスキャンの軌跡計算

宇宙機搭載用の小型軽量の降雨レーダシステムのシステムパラメータを求める。図 1 に示すように、機械的なコニカルスキャン (円錐走査) 方式のアンテナを用いる降雨レーダを考える。衛星高度を H 、走査角 (円錐の頂角と等しい) を η 、アンテナビーム幅を θ_0 とする。衛星地上軌跡の進行方向を x 軸とし、隣り合う地表面走査線に隙間が出ないように直下点方向を軸としたコニカルスキャン方式で降雨領域を覆っていく。衛星高度は 2013 年頃に打ち上げが計画されている GPM (Global Precipitation Measurement: 全球降水観測計画) 衛星とほぼ等しい $H=407$ km とした。また走査角は $\eta=17^\circ$ とした。降雨レーダの周波数は、GPM の Ku-band レーダと同じ 13.6 GHz とした。アンテナ走査は Aqua 衛星搭載のマイクロ

波放射計 AMSR-E のコニカルスキャンを想定する。アンテナ開口径は AMSR-E のオフセットパラボラ同様に、1.6 m とした。このとき、アンテナビーム幅 θ_0 は 0.9874° となる。これらの値を用いると、地上フットプリント Δr_r , Δr_s , a , b は、それぞれ、 $\Delta r_r=7.67$ km, $\Delta r_s=7.33$ km, $a=120.61$ km, $b=128.28$ km となる。衛星の地上軌跡の移動速度 $V=7.205$ km/s ゆえ、隣り合う地表面走査線に隙間が出ないように走査するには、一周する周期 T 間に衛星が x 方向に Δr_r だけ移動すればよい。この条件より、 $T=1.064$ s となる。また、コニカルスキャンの角速度は、 338.19° /s となる。

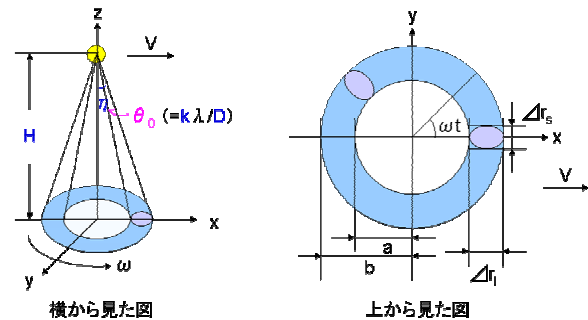


図 1 コニカルスキャンの軌跡計算

2.2 送信ピーク電力の計算

降雨は高さ $H_{ru}=5$ km, 降雨強度 $R=0.5$ mm/h の一様降雨モデルとし、降雨の層の上に厚さ $H_B=0.5$ km のブライトバンドを仮定する。降雨に対するレーダ方程式を用いて、雨域の頂で降雨強度 0.5 mm/h の雨を観測するのに必要な送信ピーク電力を計算する。雨域の頂と衛星までの距離 r_t は $r_t=(407 \cdot 5)/\cos 17^\circ =420.37$ km となる。レーダ方程式を以下に示す¹⁾。

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 (c\tau)\theta_0^2 \pi^3}{2^{10} (\ln 2) r_t^2 \lambda^2 L} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \times$$

$$Z_e \exp(-0.2 \cdot \int_0^{H_B / \cos \eta} \alpha_R dr \cdot \ln 10) \quad (1)$$

アンテナ利得 $G_0=44.9$ dB, 送信波長 $\lambda=2.20$ cm, パルス幅を τ , 光速を c とすると, $c\tau$ はレンジ方向の距離分解能の2倍であり, $c\tau=500$ m となる. システム損失は $L=3.5$ dB と見積もっている. 水の複素誘電率を ϵ とすると, 周波数が 13.6 GHz の場合, $|(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)|^2=0.9255$ である. レーダ反射因子 Z_e (mm^6/m^3) と降雨強度 R (mm/h) の関係は, マーシャル・パルマー型の雨滴粒径分布を用いて, $Z_e=234R^{1.59}$ で与えられる²⁾. また, 減衰係数 α_R (dB/km) と降雨強度 R (mm/h) の関係は, $\alpha_R=0.0237R^{1.17}$ を用いる. なお, ブライトバンドの減衰係数は, その下に存在する降雨の減衰係数の2倍を仮定する. 最小受信電力 S_{\min} は, $S_{\min}=N_F k T_e B$ より, $N_F=5.1$ dB³⁾, ボルツマン定数 $k_B=1.38065 \times 10^{-23}$ (J/K), $T_e=290$ K, $B=0.78$ MHz から求められ, $S_{\min}=109.95$ dBm となる. $r=409.91$ km のとき, 最小受信電力と等しい受信電力 P_r を得るために必要な送信電力 P_t は, $P_t=4309.23$ W となる.

2.3 パルス繰り返し周波数 (PRF) の計算 アンテナビームはペンシルビームであるが, この一つのアンテナビーム方向のことをアングルビンと呼ぶ. 各々のアングルビンをヒットする独立なサンプル数で受信電力は平均されるが, 受信電力の揺らぎを抑えるために TRMM の降雨レーダと同じサンプル数の値を用いるならば, 64 発程度は必要である. TRMM の場合は二周波アジリティという互いに 6 MHz (送信パルス幅の逆数の 10 倍) 離れた二周波数のパルスのペアを送信しているので, 一つのアングルビンを打つパルスのペア数は 32 であった. パルスのペア数を 32 発以上確保するためには, パルス繰り返し周波数 (PRF) を可能な範囲で大きくする必要がある. 図 2, 図 3 にこの条件を示す. 図 2 のように, 1 番目の送信パルスのエコーを受信してから 2 番目のパルスを送信するのではなく, 1 番目の送信パルスのエコーが n 番目と $n+1$ 番目の送信パルスの中間にくるように PRF を決定している. また, 送受切り替え時間のマージン T_m が, $10 \mu\text{s}$ 以上取れるようにする. さらに, 図 3 のように, 高度変動 ΔH のマージンやアンテナビームポインティングエラーのマージンも考慮する. $\Delta\tau$ はこの様にして決めたレーダに一番近いターゲットからのエコーとレーダに

一番近いターゲットからのエコーの時間差であり, 次式で表される.

$$\Delta\tau = 2H(1 + \theta_0 \tan \eta) / (C \cos \eta) - 2(H - H_r)(1 - \theta_0 \tan \eta) / (C \cos \eta) \quad (2)$$

また, T_{ex} は二周波アジリティを考慮した送信パルス幅の2倍の時間である. これらの条件の下に求められた PRF は, $\text{PRF}=4129\text{Hz}$ となる.

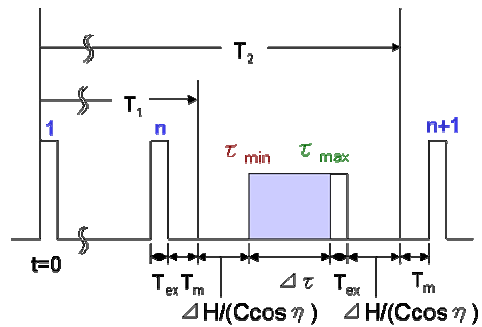


図 2 PRF の計算 1

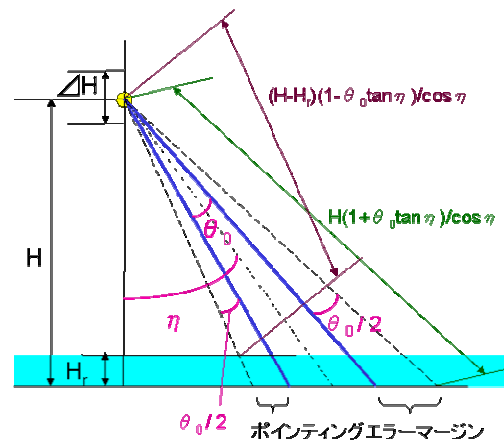


図 3 PRF の計算 2

2.4 独立サンプル数の計算 一回転の内のアングルビンの個数 N_a は, 図 4 のように, $2\pi(a + \Delta r/2)$ を Δr_s で割ることによって求めることができ, $N_a=107$ となる. このとき, 一つのアングルビン方向の滞在時間 T_a は 9.95 ms となる. これより, 各アングルビンを打つパルスペアの数 N_d は, $N_d=\text{PRF} \times T_a=41$ となり, 32 よりも大きい. 二周波アジリティを考慮すると, 独立サンプル数は 82 個を確保することができる.

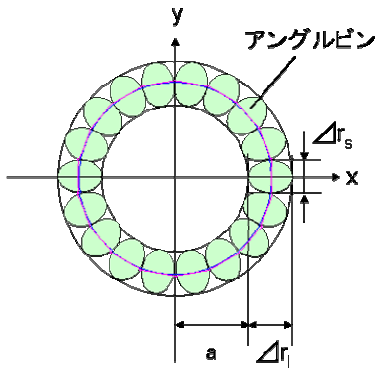


図4 独立サンプル数の計算

2.5 計算結果のまとめ

これらのレーダシステムパラメータをまとめて表1, 表2に示す. 表2では比較のために TRMM のパラメータを示す. ただし, TRMM のシステムパラメータの計算においては, 衛星高度 $H=350\text{km}$, $G_0=47.4\text{ dB}$, $N_F=2.5\text{ dB}$, Z-R 関係として $Z_e=372.4R^{1.54}$ の関係が用いられており, 送信ピーク電力の値は小さくなる.

表1 設定値

周波数 f [GHz]	13.6
アンテナの直径 D [m]	1.6
走査角 η [deg]	17
衛星高度 H [km]	407
レンジ方向の距離分解能 $c\tau/2$ [m]	250
システム損失 L [dB]	3.5
受信機の雑音指数 N_F [dB]	5.1
温度 T_e [K]	290
受信帯域幅 B [MHz]	0.78
降雨域の高さ H_{ru} [km]	5
ブライトバンドの厚さ H_B [km]	0.5
衛星高度変動分 ΔH [km]	11
観測可能な降雨の最大の高さ H_r [km]	15
降雨強度 R [mm/h]	0.5
衛星軌跡並進速度 V [km/s]	7.205

表2 計算結果

	計算結果	TRMM PR
ビーム幅 θ_0 [deg]	0.99	0.71
フットプリントの長径 Δr_l [km]	7.67	4.34~4.96
フットプリントの短径 Δr_s [km]	7.33	4.34~4.54
走査幅 (内側) $2a$ [km]	241.22	215
走査幅 (外側) $2b$ [km]	256.56	
周期 T [s]	1.064	0.59
角速度 ω [deg/s]	338.19	
アンテナ利得 G_0 [dB]	44.9	47.4
最小受信電力 S_{min} [dBm]	-109.95	-112.6
送信ピーク電力 P_t [W]	4309.23	572.1
アングルビンの数 N_a	107	49
PRF	4128.82	2773
独立サンプル数 N_d	41	33

同様の計算をアンテナ直径 $D=1.0, 1.4, 1.6, 1.8, 2.2\text{ m}$, 走査角 $\eta=1^\circ \sim 30^\circ$ の条件で行った場合の送信ピーク電力, 独立サンプル数の計算結果をそれぞれ図5, 図6に示す. 図5より走査角が狭いほど送信ピーク電力は小さいが, アンテナを小さくすると, 送信ピーク電力は大きくなってしまふことがわかる. また, 図6より独立サンプル数は走査角を狭く, アンテナを小さくしたときに多く取れることがわかる. 今後はこの結果を考慮してパラメータのトレードオフを行い, 新しい降雨レーダの仕様を決めていく必要がある.

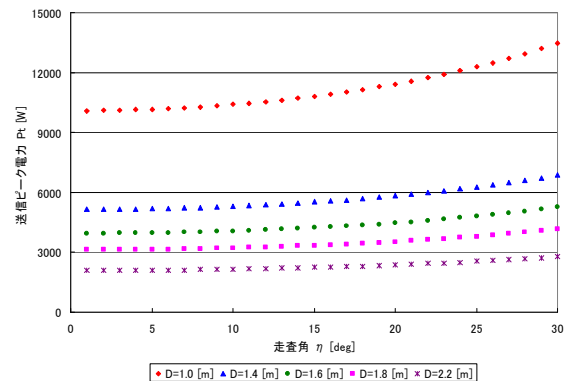


図5 送信ピーク電力の計算結果

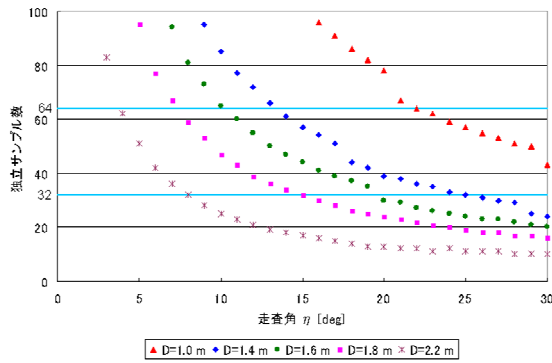


図6 独立サンプル数の計算結果

3 降雨観測シミュレーション

3.1 シミュレーションの流れ 前節で計算を行ったレーダについて雲解像モデル (Goddard Cumulus Ensemble モデル) を用いて降雨観測シミュレーションを行った. このモデルの水平分解能は $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ であり, 高さ方向の分解能は不均一であるが, 便宜的に TRMM の鉛直分解能と同じ 250 m に変換した. また, データ範囲は $512 \text{ km} \times 512 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ であり, 周期境界条件が適用されている. このモデルから算出したレーダ反射因子 Z_e を真値として降雨観測シミュレーションを行った. 高度 125 m におけるレーダ反射因子 Z_e の図を図7に示す.

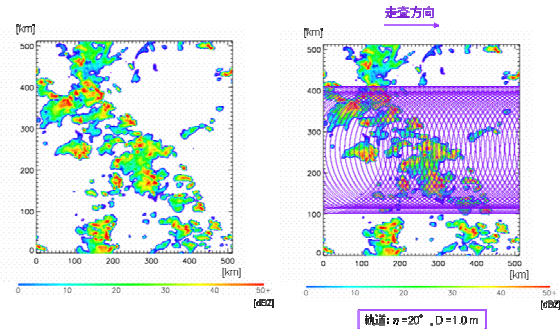


図7 高度 125 m におけるレーダ反射因子 Z_e

図8にシミュレーションの流れを示す. レーダは降雨散乱体積からの散乱電力 P_r と地表面からの散乱電力 P_s を同時に受信するため, それぞれの電力を求める必要がある. そして, それらを加算したものがレーダの合計受信電力 P となり, レーダ方程式を用いてレーダ反射因子 Z_{e_obs} に変換する.

$$Z_{e_obs} = \frac{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 r^2 P}{P_t G_0^2 \theta_0^2 (c\tau) \pi^3 |K|^2} \quad (3)$$

そして, 観測値のレーダ反射因子 Z_{e_obs} と真値のレーダ反射因子 Z_e との相関計算を求めることで, レーダの観測精度を評価する.

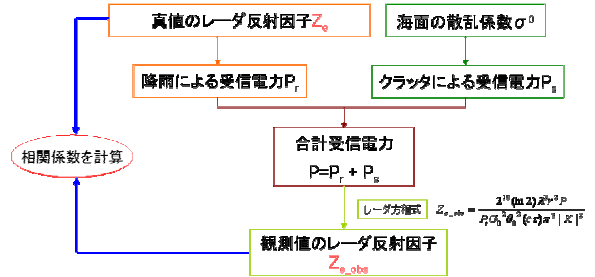


図8 降雨観測シミュレーションの流れ

3.2 降雨からのエコーの計算方法 図9のように降雨レーダが観測する降雨散乱体積は, アンテナビーム幅とレンジゲート ($c\tau/2$) ($=250 \text{ m}$) によって囲まれる体積である. 一般に, 降雨はビームの広がりよりも広がって降っているので, ビームの中心方向から角度 θ だけずれた方向についても考える. ビーム中心方向を軸とした方位角を ϕ とすると, 単位体積あたりの降雨散乱断面積は $\Sigma \sigma(\theta, \phi)$, アンテナ利得は $G(\theta)$ と表わされる. これらを用いて, レーダ方程式より, 降雨散乱体積からの散乱電力 P_r は次式で計算される.

$$P_r = \iiint_V \frac{P_t G^2(\theta) \lambda^2}{64\pi^3 r^4 L} (\Sigma \sigma(\theta, \phi)) dV \quad (4)$$

アンテナパターンをガウス型で近似すると,

$$G(\theta) = G_0 \exp \left[- \left(\frac{\theta}{\theta_0/2} \right)^2 \ln 2 \right] \quad (5)$$

また, $\Sigma \sigma$ は Z_e を用いて次のように表される.

$$(\Sigma \sigma) = \pi^5 \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \frac{1}{\lambda^4} Z_e \quad (6)$$

これを代入することにより,

$$P_r = \iiint_V \frac{P_t G^2(\theta) \pi^2}{64\lambda^2 r^4 L} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 Z_e(\theta, \phi) dV \quad (7)$$

となり, 一つの P_r の観測値が求められる. この計算をすべてのアングルビン, レンジビンについて行う. 但し, 現段階では降雨減衰の影響については考慮していないが, 将来的には考慮する必要がある.

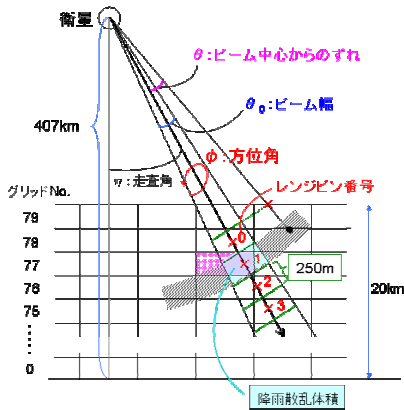


図9 降雨による受信電力の計算

3.3 地表面からのエコーの計算方法 降雨散乱体積と等距離にある地表面のエコーはレーダによって同時に受信され、グラウンドクラッタとして降雨エコーに干渉を与える。このグラウンドクラッタの発生領域を図10に示す。

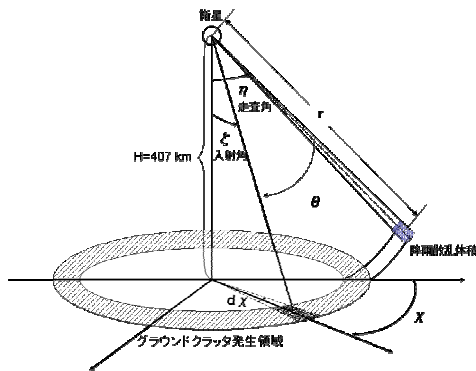


図10 地表面からのエコーによる受信電力の計算

地表面からの散乱電力 P_s は、地表面への入射角 ζ 、方位角 χ 、海面の散乱係数 σ^0 を用いて、次式から計算される。

$$P_s = \iint_A \frac{P_t G^2(\zeta, \chi) \lambda^2 \sigma^0(\zeta)}{64 \pi^3 r^4 L} dA \quad (8)$$

ここで、海面の散乱係数 σ^0 は (8) 式のように入射角の関数で表されるが、 σ^0 を求めるにあたり、Wentz らが Seasat の観測データを用いて作成した 14.6 GHz の海面の散乱係数データを利用した⁴⁾。計算条件として、風向、風速を与える必要があるが、風向には最悪値を取る向かい風方向を用い、風速には QSCAT/Sea Winds のデータより算出した海上平均風速 8.14 m/s を用いた⁵⁾。この場合の海面の散乱係数データの計算結果を図11に示す。

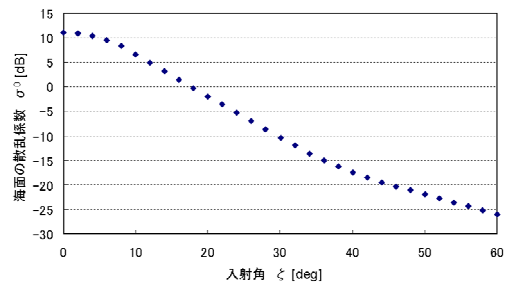


図11 海面の散乱係数

3.4 シミュレーション結果 レーダの観測精度を評価するために、降雨散乱体積の中心が属したすべてのグリッドを対象にして、レーダ反射因子の真値 Z_e と観測値 $Z_{e,obs}$ の相関係数を計算した。アンテナ直径 $D=1.0, 1.4, 1.6, 1.8, 2.2$ m, 走査角 $\eta=1^\circ \sim 30^\circ$ の条件で行った場合の計算結果を図12に示す。図より、レーダの走査角を広くした場合に、相関係数が低くなることと、アンテナの直径を大きくした場合に、相関係数が高くなることが確認された。前者はグラウンドクラッタの影響が大きくなるため、後者はビーム幅が狭くなり、注目している降雨散乱体積以外からの寄与が減少し、観測精度が上がるためであると考えられる。また、走査角が小さいときは走査角が広いときに比べて相関係数の減少率は小さいという傾向も見られた。本研究ではアンテナが小さい簡易型のレーダの実現を目標としており、走査角も 17° 程度と狭くなるが、狭い走査角においてアンテナの大きさによる観測精度の影響が小さいので、簡易型のレーダの実現性が増すと考えられる。ただし、現在は一つのデータについてのみ検証を行った段階であるので、今後は異なるデータに対しても同様のシミュレーションを行うことで、結果の信頼性を高めていく必要がある。

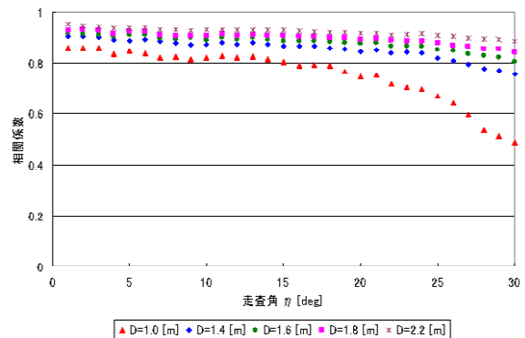


図12 相関係数の計算結果

4. まとめ

衛星搭載の新しい降雨レーダを考えるにあたり、現在問題となっている重量の大きさに着目し、コンカルスキャン型の降雨レーダを考え、そのシステムパラメータの計算を行った。さらに、アンテナの大きさ D と走査角 η をパラメータとして、送信ピーク電力と独立サンプル数を求めた。

次に、システムパラメータの計算結果を受けて、雲解像モデルを用いた降雨観測シミュレーションを行った。その結果、現状では検証件数が少ないものの、新しい簡易型の降雨レーダの実現性が期待される結果が得られた。今後は AMSR-E で用いているようなオフセットパラボラアンテナのアンテナパターンを用いることや、降雨減衰の影響を考慮するなど、より厳密なシミュレーションを進めるとともに、レーダの重量についても検討を行い、様々なパラメータとのトレードオフを行い、設計仕様を決定していく予定である。

参考文献

- 1) 岡本謙一, 阿波加純, 古津年章, 井原俊夫, 真鍋武嗣, 中村健治, “熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載降雨レーダのシステム検討”, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 15, No. 4, pp.66-80, 1995.
- 2) Marshall, J.S. and W.M. Palmer, “The distribution of raindrops with size”, J. Meteorol., 5, pp.165-166, 1948.
- 3) Toshiaki Kozu, Toneo Kawanishi, Hiroshi Kuroiwa, Masahiro Kojima, Koki Oikawa, Hiroshi Kumagai, Ken'ichi Okamoto, Minoru Okumura, Hirotaka Nakatsuka, and Katsuhiko Nishikawa, “Development of Precipitation Radar Onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, January 2001.
- 4) F. J. Wentz, S. Peteherych, L. A. Thomas, “A model function for ocean radar cross sections at 14.6GHz”, Journal of Geophysical Research, Vol.89, No.C3, pp.3689-3704, MAY

20, 1984.

- 5) Remote Sensing Systems / Home Page
(<http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/>)