

合成開口レーダデータのキャリブレーションについて

広島工業大学
広島工業大学

正会員 ○小黒 剛成
正会員 菅 雄三

1. はじめに

人工衛星に搭載された合成開口レーダ（SAR）により、天候に関わらず、また昼夜を問わず、広域の地表面状態が瞬時に観測できるようになり、SAR画像を用いた農地／森林などの土地被覆分類が行われている。SARを搭載した人工衛星としては、カナダのRADARSAT-1とヨーロッパのERS-2が現在運用中である。SARの観測原理は、まずアンテナから地表物質による吸収が殆どない周波数帯のマイクロ波パルスを地表に向けて送信し、つぎに地表で散乱された反射波パルスを同じアンテナで受信し、さらにそのデータを解析処理することで地表面状態を同定する。しかし、同じ場所であっても観測時の地表面状態（表面粗さや比誘電率）は刻々と変化するので、SAR画像の校正では衛星SARから送信されたマイクロ波を的確に反射するリフレクタが用いられる。このリフレクタには、衛星から照射された電波を単なる金属板で反射させる受動型コーナリフレクタ（CR）と電子回路で適切な値に増幅し反射させる能動型コーナリフレクタ（ACR）の2種類がある。本報告では、SAR画像の校正実験として行った受動型コーナリフレクタによる実験結果とその問題点、さらに理論計算に基づき試作した能動型コーナリフレクタの概要について述べる。

2. 受動型コーナリフレクタ（CR）による校正

1999年7月18日に広島県立五日市高校の校庭において校正実験を実施した。使用した3面コーナリフレクタは、互いに直交する3つの三角形（1辺2.3m）から構成され、人工衛星からの照射されるマイクロ波とリフレクタ平面が必ずしも直交する必要がなく、コーナに入ったマイクロ波が全て反射波として人工衛星のアンテナに戻るので設置法など取り扱いが簡単である。図-1は、同日午後6時15分頃通過した人工衛星RADARSAT-1のSAR画像で、矢印部分の明るい点が3面コーナリフレクタ（CR）、その周辺の暗い部分が校庭である。

SAR画像からコーナリフレクタの規格化後方散乱係数を計算した結果、実測値は理論値よりも10dB程度高くなり、校正値としては十分な精度が得られないことが判明した。

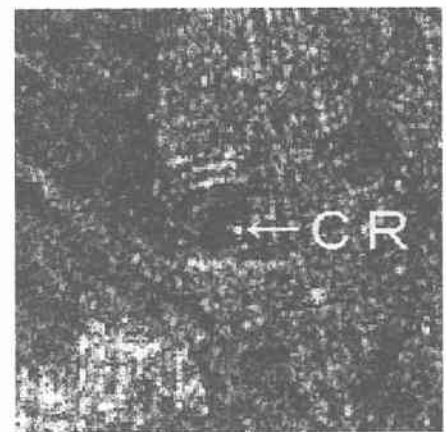


図-1 RADARSAT-1のSAR画像

3. 能動型コーナリフレクタ（ACR）による校正

受動型コーナリフレクタの問題点を回避するために、理論計算に基づき能動型コーナリフレクタを実際に試作した。ACRによるSAR信号の送受信関係の概念を図-2、ACR各部の理論特性を表-1にそれぞれ示す。

ACRにおける受信信号レベル P_{r_ACR} [dBm] は、衛星SARの送信電力 P_{t_SAT} [kW]、衛星SARの送信アンテナ利得 G_{t_SAT} [dB]、衛星SARの波長 λ [m]、衛星からACRまでのスラントレンジ距離 R [km]、ACRの受信アンテナ利得 G_{r_ACR} [dB] より算出される。ただし、スラントレンジ距離 R [km] は衛星の高度 h [km] とACRにおけるSAR信号の入射角 θ_i [deg] より、 $R=h/\cos(\theta_i)$ で近似する。

$$P_{r_ACR} = P_{t_SAT} / (4\pi R^2) * G_{t_SAT} * \{\lambda^2 / (4\pi) * G_{r_ACR}\} \text{ [dBm]} \quad (1)$$

ACRにおける送信信号レベル P_{t_ACR} [dBm] は、受信信号レベル P_{r_ACR} [dBm] とACR装置全体の増幅率 $G_{_ACR}$ [dB] から次式で算出される。ただし、ACR装置全体の増幅率 $G_{_ACR}$ [dB] は、増幅器単体の最大利得 G_{max_ACR} [dB] から固定減衰器の減衰率 A_{f_ACR} [dB]、可変減衰器の減衰率 A_{v_ACR} [dB]、内部ケーブル損失 A_{c_ACR} [dB]を差し引いた値とする。

$$P_{t_ACR} = P_{r_ACR} + G_{_ACR} = P_{r_ACR} + (G_{max_ACR} - A_{f_ACR} - A_{v_ACR} - A_{c_ACR}) \text{ [dB]} \quad (2)$$

ACRの増幅器単体の最大利得を60 [dB]、固定減衰器の減衰率を3 [dB]、可変減衰器の減衰率を最小値0 [dB]、内部ケーブル損失を約3.3 [dB]と仮定し、人工衛星SARの仕様を式(1)および式(2)に代入すると、ACRの送受信レベルが算出できる。また、送信レベル $P_{t_ACR} = +25$ [dBm] は約0.32 [W]の送信電力（尖頭値）に相当するので、ACRにおける送信電力（尖頭値）が算出できる（表-2）。

実際の校正実験では、SAR画像上でACRの位置が判別しやすいよう周囲の反射波ができるだけ小さい場所に設置する。まず、ACRの後方散乱断面積を σ_{ACR} [dBm²]、背景の正規化後方散乱断面積を σ^0_b [dB/m²]、SAR画像上の空間分

解能（レンジ方向×アジマス方向）をA [m²] とすれば次式が成立する。

$$S_b = \sigma_{ACR} / (\sigma_b^0 * A) \text{ [dB]} \tag{3}$$

つぎに、ACRの後方散乱断面積 σ_{ACR} [dBm²] は、ACRの受信アンテナ利得 G_{r_ACR} [dB]、ACR全体の電力増幅度 $G_{_ACR}$ [dB]、送信アンテナ利得 G_{t_ACR} [dB]、波長 λ [m] より次式で与えられる。

$$\sigma_{ACR} = \lambda^2 / (4 \pi) * G_{r_ACR} * G_{_ACR} * G_{t_ACR} \text{ [dBm}^2\text{]} \tag{4}$$

一方、ACRの後方散乱断面積 σ_{ACR} [dBm²] の不確定性を0. 5 [dB] に維持するためには、 $S_b = 2. 5$ [dB] 程度必要である。通常の土壌（グラウンド）の正規化後方散乱係数 σ_b^0 は-10~-25[dB/m²]の範囲になるので、校正実験時にACRに要求される後方散乱断面積の最小値 σ_{min_ACR} [dBm²] は次式で与えられる。

$$\sigma_{min_ACR} = S_b + \sigma_b^0 + 10 / 0. 5 \log_{10} A \text{ [dBm}^2\text{]} \tag{5}$$

表-1および表-2より、ACRの後方散乱断面積 σ_{ACR} および背景の後方散乱係数 σ_b^0 が-25 [dB/m²] の場所にACRを設置した場合に必要な後方散乱断面積の最小値 σ_{min_ACR} [dBm²] を算出した（表-2）。今回試作したACRは理論上SAR画像の校正実験に十分な精度で対応できるものと考えられる。

4. おわりに

今回はSAR画像の校正の一環として、まず受動型コーナリフレクタによる校正実験を行った。その結果、受動型3面コーナリフレクタは取り扱いが容易であるが、実測値が理論値よりも10 dB程度高くなり、校正値としては十分な精度が得られないことが判明した。

つぎに、受動型コーナリフレクタの問題点を回避するために、理論計算に基づき能動型コーナリフレクタを実際に試作した。理論計算では試作した能動型コーナリフレクタで十分な精度で校正実験が行えるものと思われる。

今後の課題として、試作した能動型コーナリフレクタを用いた校正実験を行い、精度検証を行うことがあげられる。

表-1 ACR各部の主な特性（公称値）

名称	公称値
増幅器単体の最大利得 G_{max_ACR} [dB]	60
固定減衰器の減衰率 A_{t_ACR} [dB]	3または10
可変減衰器の減衰率 A_{v_ACR} [dB]	0～69
受信アンテナの利得 G_{r_ACR} [dB]	13
送信アンテナの利得 G_{t_ACR} [dB]	13

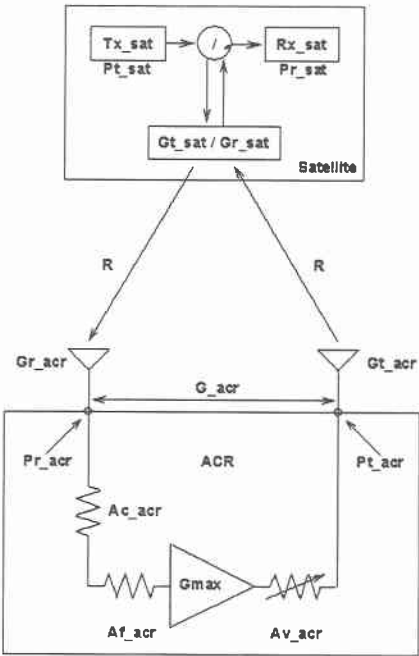


図-3 ACRによるSAR信号の送受信関係

表-2 ACRにおける受信信号レベル／送信信号レベル／送信信号電力／後方散乱断面積

	ERS-2	RADARSAT-1
波長 λ [m]	約0.057	
衛星の高度h [km]	約777	約798
衛星SAR信号の入射角 θ_i [deg]	約23	約10～60
スラントレンジ距離R [km]	約853	約810～1596
衛星SARの送信アンテナ利得 G_{t_SAT} [dB]	約41.6	約45.1
ACRの受信信号レベル P_{r_ACR} [dBm]	約-44.13	約-49.39～-43.51
ACR装置全体の利得 $G_{_ACR}$ [dB]	53.7	
送信信号レベル [dBm]	+9.57	+4.31～+10.19
送信信号電力（尖頭値）[mW]	約9.057	約2.67～10.45
ACRの後方散乱断面積 σ_{ACR} [dBm ²]	約43.77	
背景の後方散乱係数 $\sigma_b^0 = -25$ [dB/m ²] の場合に 必要な後方散乱断面積の最小値 σ_{min_ACR} [dBm ²]	約28.92	約43.35