

8. SAR による地球表層観測

8.0 SAR は何がエライか/スゴイか？

SLR、VLBI、GPS ←高精度だが、地上観測点が必要

InSAR の登場(画像としての変位データ、地上観測点不要)

Radar: Radio Detection And Ranging

SAR: Synthetic Aperture Radar 合成開口レーダ

InSAR: Interferometric SAR 干渉 SAR、SAR 干渉法

8.1 SAR でしていること/わかること

SAR アンテナ(センサー)を搭載した飛翔体(衛星や航空機)は、マイクロ波のパルス(長さ τ_p)を(衛星進行方向と概ね直交する方向の)斜め下方に送信しつつ、反射波を受信している「能動型センサー」である。気象衛星ひまわりのような、可視光(太陽光)の反射を利用するのは「受動型センサー」である。

SAR 画像は二次元画像として得られる。電波照射方向をレンジ方向、衛星進行方向をアジマス方向と呼ぶ。これは二次元の極座標表示の用語の名残で、本来、レンジとはアンテナからある物体までの距離のこと、アジマスとはその物体の真北から時計回りに測った角度(方位角)のことであった。

受信波形(の振幅)は Target の性質で変わる:

強い反射(人工物、ビル、船など)

弱い反射(上記以外..)

反射なし(波立たない海面、滑走路)

反射強度画像(SAR 画像)は、白黒(grayscale)の濃淡で表現されるが、いわゆる「白黒写真」とは、違うメリットがある。全天候性、昼夜無関係。

常に同じほぼ正弦波の波形を使う⇒位相が分かる(距離情報を持つ)

SAR データは振幅と位相を持つ。すなわち、複素数

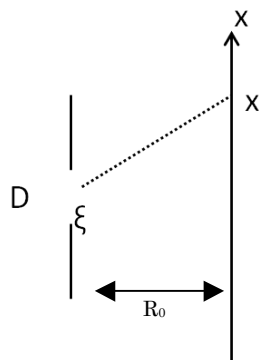
$$\begin{aligned}d &= \text{Re} + i * \text{Im} = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \left(\frac{\text{Re}}{\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}} + i \frac{\text{Im}}{\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}} \right) \\ &= \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} e^{i\varphi}\end{aligned}$$

「反射強度画像」として提示されるのは、上式の二乗和の **root** の部分である。位相 φ には、衛星地表間の距離情報が含まれているが、 $[0, 2\pi]$ に丸め込まれる (Wrap される) ので、単独の SAR データの位相を「画像」にしても、砂嵐のようにしか見えない (配布資料の図参照)。しかし、画素の一つ一つが持つ位相 φ には幾何学的情報が含まれていて、後述の InSAR では本質的な役割を担う。

8.2 SAR 画像の空間分解能

8.2.1 実開口レーダの分解能：ホイヘンスの回折理論による。

開口長 D の 1 次元アンテナを考える。アンテナ上の放射源が遠方で作る電場 (の空間パターン) は、



$$E(x) = \int_{-D/2}^{D/2} \frac{1}{r} \exp(ikr) d\xi$$

$$(i = \sqrt{-1}, k = \frac{2\pi}{\lambda}, e^{i\omega t} \text{は除く})$$

$$r = \sqrt{R_0^2 + (x - \xi)^2} \cong R_0 - \frac{x\xi}{R_0} \quad (R_0 \gg x, D \text{ ならば})$$

r が λ 程度変化すると、 $\exp(ikr)$ は大きく変化するのに対して、分母は $R_0 \gg x, D$ ならば $r = R_0$ としてもよい。よって、

$$E(x) = \frac{\exp(ikR_0)}{R_0} \int_{-D/2}^{D/2} \exp(-i \frac{kx\xi}{R_0}) d\xi \quad (\text{この式は矩形関数のフーリエ変換に他ならない})$$

$$= E_0 \frac{\sin \left[\frac{\pi D}{R_0 \lambda} x \right]}{\frac{\pi D}{R_0 \lambda} x} = \text{sinc} \left(\frac{D}{R_0 \lambda} x \right)$$

この式は sinc 関数と呼ばれ、 $x=0$ でピークを持ち、 $[-R_0 \lambda / D, +R_0 \lambda / D]$ の範囲で大きな振幅を持ち、この外側では一気に振幅が小さくなる。ピーク周辺からの電場が「メインビーム」となる。

ピークの振幅の半分になるビーム幅は、およそ $R_0 \lambda / D$ であることから、角度分解能はおよそ λ / D であることが分かる。つまり角度分解能を高めたいければ、短い波長で大きなアンテナを作れば良い。だから、望遠鏡 (アンテナ) は大きいほど良い、ことになる。

8.2.2 SAR の空間分解能

アジマス方向の分解能

実開口レーダの理論通りに λ/D の角度分解能だとすると、高度 700km 上空の衛星と地表の距離は入射角 35 度程度で 800km 程度となり、空間分解能は km 程度の値になる。これでは分解能としてはあまりにも悪い。

SAR では、飛翔体に搭載したセンサーが、移動しながらパルスの反射波を取得する（かき集める）ことで、あたかも空間上(アジマス方向) に大きなアンテナを合成して、アジマス方向分解能を高めている。「合成開口レーダ」の語源は、アジマス分解能にある。

実際のアジマス分解能(の限界)は、 $D/2$ という興味深い結果になる。つまりアンテナのサイズのみで決まり、飛行高度や波長にも関連しない(!)。詳しい導出は、「合成開口レーダの基礎(大内和夫著)」や「マグマダイナミクスと火山噴火(鍵山恒臣編)」にある。

レンジ方向の分解能

レンジ分解能を高めたければ、光速 c は変わりようが無いのでパルスの幅(長さ) τ_p を短くすれば良く、単純な矩形パルスだとすれば分解能は $c\tau_p/2$ で与えられる。しかし、数百キロ上空から数 nano 秒のマイクロ波パルスを送信することは、距離に依る減衰を防ぐために強力な送信出力が必要になる。実際に使われているパルス長 τ_p は 20-40 μ sec 程度であるが、この程度でもレンジ方向分解能を数メートル程度にすることが出来るのは、マイクロ波パルスの波形が鍵を握っている。

パルス波形は有限長 τ_p を持っているが、式で書くと $\sin(2\pi f_0 t + \pi K t^2)$ のように表せる。有限長の正弦波パルスから $\pi K t^2$ の分だけ異なっており、正弦波パルスが「周波数変調」(Frequency modulation)されていることが分かる。つまり有限長 τ_p 時間の中に、瞬間周波数が $f(t) = f_0 + Kt/2$ のように一次関数的に線形に変化する： f_0 は搬送波周波数である。つまり $K\tau_p/2$ だけ周波数が増加し、これを特に「バンド幅 B_w 」(単位は Hz)とよぶ。そして、レンジ分解能は $c/(2B_w)$ で与えられる。バンド幅を大きくすれば、レンジ分解能は上がる:パルス長 τ_p には依存しない(!)

周波数変調で分解能を高められる理由は、現実には込み入った手順が必要だが、直感的に説明すると、変調パターンが既知なので、受信後に“周波数毎に”

受信信号を“並べ替える操作”が可能だからである。たとえば f_1, f_2, f_3 の3種の周波数がこの順番に並んで(長さ τ_p で)受信されるので、受信後に3種の周波数のパルスを積み重ねれば、実効的なパルス長は $\tau_p/3$ となる。という具合に、周波数“変調”の幅を大きくして、レンジ分解能を高めている。

ちなみに、このような変調は線形周波数変調とよばれ、そのように変調されたパルスを特に「チャープパルス(チャープ信号)」とよぶ。SAR 以外のセンサーでもよく用いられるもので、海面高度計でも利用されている。

8.3 InSAR の原理

1枚の SAR データの位相は、センサーと地上ターゲットの往復距離を位相で測った(波長で割って 2π かける)幾何学的な意味がある。実際に最初に求まる位相データは、次式の整数値部分は不確定で(Integer ambiguity), 余りの部分しか分からない: GNSS(GPS)の位相データと(往復距離になる以外は)全く同じ。

$$\phi_1 = 2R_1 \times \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2R_1}{\lambda} \times 2\pi = \frac{4\pi R_1}{\lambda} = 4\pi(N_1 + \text{mod}(2R_1, \lambda))$$

ほかに、地上ターゲットの電気的特性(誘電率)や伝搬経路上の屈折率分布による位相(変化)もあるが、とりあえず無視する。

InSAR ではかならず複数の位相データが必要である:

$$\phi_2 = \frac{4\pi R_2}{\lambda}$$

InSAR の原理は、ヤングの干渉縞の原理そのものである。ヤングの干渉縞とはスリットから出る二つの同一波長の波が、一定距離だけ離れた壁に到達したときの「行路差」に応じて、その壁の一点で波同士が同位相で重なれば強めあって振幅が大きくなり、逆位相で重なればキャンセルされるために生ずる縞模様のことである。InSAR で現れる干渉縞は、強度の縞模様ではなく「行路差(経路差)」に応じた「位相そのものの縞模様」になるので、反射強度の強弱を表すものではないが、本質的には二つの波の「干渉」がどう見えるかの違いである。InSAR 画像のデータは、単に位相とよばれることは多いが、厳密には二枚の位相データの差である:

$$\text{位相(差)} \quad \psi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) = \frac{4\pi}{\lambda} \delta R$$

干渉縞 = 軌道縞(Flat Earth Fringe)+地形縞+変動縞+大気遅延

二時期をずらせば、(地殻)変動縞と大気遅延が得られる。

軌道縞は軌道データ、地形縞は DEM を用いて推定、補正される。

8.4 InSAR がうまく行くための条件：

干渉縞が見えるためには、二時期の位相データが“似ている”必要があり、そのようなデータは、「相関」が高い、コヒーレンス(coherence)が高い、などと言われる。さらに

1. 軌道間距離への制約：短い方がよい
2. 地表面変化と使用波長による制約。
もある。

9. 人工衛星による高度測定と重力場測定

9.1 衛星高度計 Altimeter

マイクロ波/レーザーパルスで往復時間 Δt を測定

$$h = \frac{c\Delta t}{2} + N$$

ただし、N は楕円体面からの高さ。

例1) レーザー高度計

かぐや搭載の LALT⇒地形図

ICESAT⇒氷河・氷床のモニター

例2) マイクロ波(レーダー)高度計

特に海面高度計⇒ジオイド高 V の直接測定

海上のジオイドデータ⇒重力異常⇒海底地形(海山)の発見

Altimetry の歴史

GEOS(1975) $\pm 50\text{cm}$

SEASAT(1978) $\pm 10\text{cm}$

GEOSAT(1985) $\pm 4\text{cm}$

Topex/Poseidon(1992) $\pm 2\sim 3\text{cm}$

JASON1(2001) $\pm 2\sim 3\text{cm}$

JASON2(2008) $\pm 2\sim 3\text{cm}$

精度向上によって海水面の時間変化が無視できなくなった（それを利用するようになった）

$$h = \frac{c\Delta t}{2} + N + H$$

但し、H は力学的海面高度(海流、潮汐)

9.2 衛星重力ミッション

- SLR による軌道追跡 ($\rightarrow J_2, \Delta J_2$ などの決定)
- Altimetry によるジオイド測定
- Satellite-Satellite Tracking (SST)

- High-Low SST, GPS ($\sim 20000\text{km}$)+LEO 衛星 (CHAMP)
- Low-Low SST, GRACE (米独共同)

↓

Gravity Recovery and Climate Experiment

2002年3月～

(原理)

同一軌道上の2つの衛星 A,B が ΔS はなれているとき

重力ポテンシャルが一樣 \rightarrow 相対速度 (Range rate)

実際には非一樣なポテンシャル $T(s)$ があるので、

$$\frac{\partial T}{\partial S} dt = dv$$

時間 dt の間に $dv(\text{range rate})$ だけ変化 $\Rightarrow T$ を測定

GRACE: Ku 帯(24.32GHz)のマイクロ波の dv を測定

GRAIL: 月の重力場測定(3~4 カ月で終了)

GRACE Follow on 2016年予定、レーザー干渉計、高感度化 \Rightarrow 高分解能化が期待