地上観測用マルチモード差分干渉レーダ GPRI

Charles Werner, Gamma Remote Sensing, CH-3073 Gümligen, Switzerland Andreas Wiesmann, Gamma Remote Sensing, CH-3073 Gümligen, Switzerland Tazio Strozzi, Gamma Remote Sensing, CH-3073 Gümligen, Switzerland Andrew Kos, Terrarsense AG, CH-9470 Werdenberg, Switzerland Rafael Caduff, Gamma Remote Sensing, CH-3073 Gümligen, Switzerland Urs Wegmüller, Gamma Remote Sensing, CH-3073 Gümligen, Switzerland

概要

本書はガンマ社が開発した Gamma 可搬式レーダ干渉計 (Gamma Portable Radar Interferometer) について解説していま す。本計測機は、レーダ干渉により地表面の変動を 0.2mm 未満の精度で観測し、さらに数値標高モデル (DEM) を作成でき ます。地上で行う干渉法による観測は人工衛星や航空機による合成開口レーダ (SAR) の観測を補完するものです。地上での 観測は短期間の変動を追跡するため連続的に実施することができ、また、経時的な無相関や大気による位相変動の影響を軽 減することができます。以下では、アルプス最大の氷河アレッチ氷河、氷河の下流に広がるアレッチの森、ベルンのコルン ハウス橋等の試験観測の結果をご紹介します。

はじめに

ガンマ社が開発した Gamma 可搬式レーダ干渉計 (GPRI) は、17.1 ~ 17.3GHz で作動する多重モード FM-CW レーダ です(図1)。このシステムは完全にコヒーレントであり、 視線方向 (LOS) に沿って目標物の動きを干渉によって観測 することができます。レーダの照射距離は 20m から 10km



図 1:GPRI 観測機器。2011 年 6 月 27 日、アレッチ氷河を見下ろす。 (5 ページ参照)

です。衛星や航空機のレーダシステムに比べ、地上での観 測は最適な視界と感度を得るための撮影位置の選択が柔軟 に対応できます。他の利点としては、観測を頻繁に繰り返 すことによって急激に変動する地物を正確に追跡する性能、 より短い波長によって高い感度でLOSに沿った変動の観測 が可能、多重観測により信号雑音比 (SNR)を向上させて対 流圏内の水蒸気によるパス遅延の変動を軽減する機能など が挙げられます。

1 装置の仕様

レーダはコンピュータ制御された方位スキャナ上に設置 されたアンテナ塔で構成されています。アンテナ塔は1本 の送信用アンテナと2本の受信用アンテナを支えており、 それら3本で25cmの垂直方向の基線長を持った干渉アレ イを形成します。RF電子機器はアンテナ塔上に設置された 筐体の中にあります。電力と制御は三脚の近くに置かれた 全天候性筐体に収められた計測用コンピュータと電源によ り供給されます。ベースバンド信号は計測用コンピュータ の筐体にあるデュアルチャンネルのソフトウェアベースの 電波解析システム (SDR)によってデジタル化されます。塔 上にある GPS 受信機は GPRI に対して基準の周波数と時刻 を提供し、これによって複数の GPRI 装置を同期運転するこ とができます。

GPRI は 2.06m の管状導波管アンテナを使用し、方位方向 に 0.4 度、鉛直方向に 35 度のファンビームを生成します。 画像取得の際、レーダは 1 秒間に 0.5 から 10 度のプログラ ム可能な回転速度で観測地点を 1 行ずつスキャンします。 画像 1 枚を取得するのにかかる時間は方位角 180 度の範囲 を走査しておよそ 20 秒です。方位方向の分解能はレーダの 到達距離に比例し、1km の距離で 8.0m です。観測データ 間の 8.715mm の差分的な動きが 2 π ラジアンの差分位相 をもたらします。2 枚のシングルルック・コンプレックス (SLC) 画像から生成される差分干渉画像の位相ノイズは参考 文献 [1] の以下の式によって与えられます。

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{\text{SNR}}}$$

表1に SLCの SNR(信号雑音比)と変動計測の標準偏差との関係を示します。

SNR (dB)	σ_{arphi} (deg.)	σ , (mm)
30	1.81	0.044
20	5.73	0.139
10	18.1	0.438

表1:GPRIを使った経路長測定のシングルルック標準偏差

GPRI 計測機によって使われる FM-CW 波はプログラム可 能なパルスレート (100-4000 Hz) のベースバンド 100-300 MHz でのダイレクトデジタル合成 (DSS) によって生成され ます。DDS チャープ波形は 900-1100 MHz の中間周波数を 使って、二段階で 17.1-17.3 GHz に周波数変換されます。ト ランスミッタの出力はおよそ 100mW です。

受信機フロントエンド部は低雑音増幅回路が繋がってい る中空フィルタとアイソレータで構成されています。IQ 直 交ミキサ (IQ quadrature mixer) は入力信号の周波数を 900-1100MHz の中間周波数まで下げるために使われます。FM チャープ信号のデランプ処理は 900-1100 MHz の中間周波 数の受信信号の増幅後に行われます。アクティブバンドパ スフィルターは 0.025 から 2.8MHz のフィルタバンドパス を使ってデランプしたミキサ出力を増幅します。各チャン ネルは実効レート 6.25 MHz で 16bit データにデジタル化さ れます。上と下のアンテナに対して別々の受信機が使われ ます。

2 Radar データの処理

FM-CW レーダの RAW データはレンジ方向のプロファイ ルを得るために高速フーリエ変換処理が必要です(参考文 献[2])。デジタル化されたエコーはアジマス推定比を使って 処理されます。通常、信号雑音比の向上には 5:1 を使います。 レーダの電波強度が半分になるレンジ方向の解像度は測定 上 0.94m で、アンテナの方位方向のビーム幅は測定上 0.46 度 です。チャープ周波数の非線形性のためにレンジ圧縮した チャープ信号には拡散は現れません。レンジとアジマスの ポイントターゲットのピークサイドローブレベルはレンジ とアジマスの両方向で -28dB です。

3 データ収集モード

動いている目標物の干渉法測定を行うには、観測期間中、 散乱がコヒーレントな状態であることが必要です。短い間 隔で連続観測を行うと、経時的な無相関が減少し、運動に よる位相シフトを最小化します。これによって観測精度が 向上するので、地上での干渉レーダによる観測において重 要です。観測対象の変動度合に応じて、異なる計測方式を とる必要があります。

3.1 DEM の生成

数値地形モデル作成のための干渉画像は GPRI の上部と下 部の受信チャンネルからの干渉計測によって得られます(参 考文献[3]を参照)。これらの DEM は上空やレーダ位置か らの視界に対応する投影法を使って、変動データの可視化 に使われます。

GPRIを1台配置すれば上部と下部のアンテナから多数の 干渉画像が得られるので、個々の干渉画像を平均化して信 号雑音比を向上するのに役立ちます。データは短い時間間 隔(20ms 未満)で同時に取得されるのでこれらの干渉画像 には経時的な無相関がほとんどありません。干渉による位 相は上部と下部のアンテナの経路差によって決まります。 そして、それは仰角とスラントレンジの直接的な関数です。 干渉による位相は位相アンラッピングによりレーダの位置 や観測地点内の一箇所の標高情報と組み合わせて、DEMの 標高情報に変換されます。レーダ強度と組み合わせた上下 の干渉画像の干渉位相は図2のようになります。



図 2:基線長 25cm の上部 / 下部のアンテナから生成した干渉画像

図2はベットマーホルンから観測したアレッチ氷河のデー タです(図1を参照)。この図では干渉画像が縦軸に方位(走 査角度)、横軸にスラントレンジ(左から右に大きくなる) を表示しています。それぞれの縞は上部と下部のアンテナ で受信した信号間の経路差 8.71mm を表しています。

3.2 1日あたり cm レベルの変動

氷河や鉱山の壁のような地物の変化量は1日当たり cm から m の範囲です。このモードではレーダは一箇所に配置 され、観測間の変動が数 mm を超えないよう1~10分の 間隔で連続して行います。一般的に N-1(個)の時系列の干 渉画像は (1,2), (2,3), (N-1, N)の観測データのペアから計算 されます。このような時系列は経時的な無相関と変動によ る位相の変化の両者を最小限に抑え、位相アンラッピング の精度を向上させます。

差分干渉画像のペアから個々の差分干渉画像のスタッキン グ(積み重ね)によって平均的な変動速度が計算できます。



図 3:アレッチ氷河。視線方向の平均変動速度、1 カラーサイクル 150m/年。

アレッチ氷河における4時間を超える3分間隔での観測 で得た73枚の差分干渉画像のスタッキングにより、最大変 動速度が視線方向に150メートルだと分かりました(図3)。 山頂で位相信号が観測されるのは大気によるパスの変動の ためです。観測された氷河の速度は、Strozzi他(参考文献[4]) がTerraSAR-Xのトラッキング機能によって得た結果と一致 します。

3.3 年間 cm レベルの変動

がけ崩れや地滑り、地殻変動のような地物の緩慢な動き の観測では、1日の変動がたいへん小さいので複数回の観 測が必要です。観測する日は大気によるパス遅延のばらつ きを最小限に抑えるだけでなく、SNRを向上させるために、 数時間かけて測定データを取得する必要があります。この 種の計測の重要な問題は、レーダのアンテナを元の位置か ら約1cm以内の精度で再配置する必要があることです。こ れは地形高度に起因する干渉位相成分を最小限にするため に必要なことです。こうした観測のためには恒久的な台座 を設置するのが良いでしょう。

こうした例として、アレッチ氷河に隣接した斜面で発生 しているアレッチの森の地滑りが挙げられます。この地滑 りは TerraSAR-X と GPRI の両者を使って観測が行われまし た。TerraSAR-X の観測は 2011 年 6 月 11 日と 2011 年 7 月 25 日に行われました。GPRI の観測は 2011 年 6 月 27 日と 2011 年 8 月 10 日に氷河の谷の反対側の側面より行われま した。TerraSAR-X の画像の干渉による縞模様は視線方向に 15.6mm の移動を示しています。視線方向の地殻変動を地 図に投影した画像を図 4、図 5 に示します。GPRI のデータ は地殻変動に対して高い空間解像度と感度を持っているの がわかります。



図 4:2011 年 6 月 27 日と 2011 年 8 月 10 日の間の GPRI によるアレッチの森の観測。

3.4 毎分 cm 以上の変動

GPRIは4kHzまでの周波数で固定した方向から高速の連 続地殻変動測定を行う能力があります。これによって橋の ような構造物の連続的な変形や、河川の表面速度でさえ計 測可能です。図6は2011年7月1日に観測したコルンハ ウス橋を横断するトラムです。



図 5:TerraSAR-X による視線方向の変動 (2011 年 6 月 11 日~ 2011 年 7月 25 日)



図 7:コルンハウス橋の変動位相 (視線方向)。観測時間 30秒。1 カラー サイクルは 8.71mm の動きを表す。



図 6:ベルンのコルンハウス橋を右から左へ横断するトラム。GPRI は 橋の下の右岸にあります。

GPRI は橋の下に配置されており、右岸土手から仰角 40 度 で見上げています。変動の計測はサンプリングレート 2kHz で行われました。図 7 は橋を横断中の干渉による変動位相 を示しています。視線方向に最大 6mm の変動があること を示しています。最初、路盤はレーダから遠ざかる方向に 動いていました(上)が、トラムが通過して路盤を押し下げ ると、レーダの方に向かう動きに変わりました(下)。

終わりに

GPRIの解説と視線方向の変動を計測し、干渉 DEM を生成するいくつかの観測例について紹介しました。地上設置型のレーダを使って短期間の観測が可能になれば、差分干渉アプリケーションの適用対象を氷河や構造物のように比較的高速で動く物体にまで広げることができます。

参考文献

[1]Dainty, J.C. (Editor), "Laser Speckle and Related Phenomenon", pp. 29-35, Springer-Verlag, Berlin, 1984

[2]Carrara, W.G. Et all "Spotlight Synthetic Aperture Radar", pp 27-30. Boston, Artech House Inc. 1995

[3]Strozzi, T. C. Werner, A. Wiesmann, and U. Wegmüller, "Topography mapping with a portable realaperture radar interferometer", accepted for publication in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.

[4] Strozzi, T., R. Delaloye, H. Raetzo, U. Wegmüller, C. Werner and A. Wiesmann, "Survey of Landslide Activity, Rock Glacier Movement and Surface Glacier Velocity", Proceedings of the 4th TSX Science Team Meeting, DLR Oberpfaffenhofen, Germany, 14-16 February 2011", see http://sss.terrasar-x.dlr.de/

[5]Strozzi, T., R. Delaloye, A. Kääb, C. Ambrosi, E. Perruchoud, and U. Wegmüller, "Combined observations of rock mass movements using satellite SAR interferometry, differential GPS, airborne digital photogrammetry, and airborne photography interpretation," Journal of Geophysical Research, 115, F01014, doi:10.1029/2009JF001311, 2010.

謝辞

本研究開発は、スイス教育研究州事務局のスイス宇宙 局によって、宇宙活動に関連したスイスの科学的、技術 的競争力を育成、促進するため、スイスイニシアティブ 政策の支援金を受けています(契約番号 A2310.0441 号)。 TerraSAR-X のデータ ©DLR (2011) は DORIS FP7 プロジェク トより提供されたものです。

Gamma 可搬式レーダ干渉計 (Gamma Portable Radar Interferometer)

