

GAMMA L-Band SAR v1.3 20-Aug-2019

# GAMMA-LバンドSAR

#### はじめに

GAMMA-LバンドSARは、コンパクトで多用途のFM-CW方式のSARシステムです。機動性の高いセンサを使って、 干渉法(リピートパスおよびシングルパス)、偏波解析や多偏波干渉法によりSARデータ取得を行うことができま す。本稿では、ハードウェアの主な特徴、SARデータの処理手法、ならびに航空機搭載(垂直離着陸(VTOL)UAV)お よび地上設置(車載型およびレールベース)でのリピートパス干渉SARの取得における具体的な使用事例について 説明します。2枚のリピートパスSAR画像あるいは長期間のリピートパスSAR観測結果を用いることで、レーダの視 線方向の地表変位を求めることができます。ここでは例として、車載SAR干渉計での氷河流に起因する地表変位 の干渉観測やUAV搭載リピートパス干渉計での山岳谷の傾斜観測のデモを紹介します。

#### 適用事例とSAR搭載のプラットフォームについて

GAMMA-LバンドSARは、小型で軽量なため、さまざまなプラットフォームに搭載可能な多用途のSARシステムです。GAMMA-LバンドSARは、これまで次のような航空機搭載および地上設置型プラットフォームでのリピートパス 干渉観測に使用されてきました。

- 航空機搭載:
  - ・ VTOL UAV: ScoutB1-100(無線ヘリコプタ)、Aeroscout GmbH (http://www.aeroscout.ch)
- 地上設置型:
  - ・ 道路走行中の自動車
  - リニアレール(合成開口長:2~12 m)

GAMMA-LバンドSARシステムを使用して、氷河速度流推定アプリケーションや傾斜安定性評価アプリケーションによる視線方向の地表変位の観測について実証が行われました。システムでサポートされるそれ以外のアプリケーションと観測モードとしては、偏波解析や多偏波干渉法、SARトモグラフィー(断層撮影法)があります。



スイス中央部でのリピートパス干渉SARデータ取得中 のAeroscout社のVTOL UAV Scout B-100機に搭載さ れていたGAMMA-LバンドSAR。UAVICはHoneywell 社HGUIDE n580 INS/GNSSシステムが装備されていま す。GNSSデータは、現地にこのために設置されたロー カルGNSS観測基準点で後処理キネマティックモードで 処理されます。SARアンテナ/チャネル構成は、送信用/ 受信用アンテナ各1台を使用。

ETHチューリッヒとの実証試験中、車両に搭載された GAMMA-LバンドSAR。iMAR Navigation GmbHによるリン グレーザージャイロINS/GNSSシステム(iNAV-RQH)を使用 して、高精度の位置決めと姿勢決定が行われました。GNSS データは、現地に臨時に設置されたローカルGNSS観測基 準点で後処理キネマティックモードで処理されます。SARア ンテナ/チャネル構成は、送信用アンテナ1台/受信用アンテ ナ3台を使用。 GAMMA-LバンドSARのレールベースでの地上設置型観測装置。氷河のリピートパス干渉SARの時系列データを短い間隔で自律的に取得することを目的としています。



## Lバンドレーダハードウェア

表1に、航空機搭載/車載取得モード用に構成されたLバンドFM-CW SARシステムの仕様について概要を示しま す。Lバンドレーダには、同時に作動可能な4つの低ノイズレシーバチャネルがあります。カスタム設計のFPGA 14ビ ット/チャネルデジタイザ(AD変換器)は、4つのチャネルすべてを同時に記録し、これらのデータをSSDにストリーミ ングします。レーダ装置は、Linuxベースのコンピュータによって制御されます。トランスミッター(送信器)の最大出 力は10W(実験では5W使用)で、完全な偏波解析データの取得、シングルパス方式のクロストラックおよびアロン グトラック干渉データの取得、さらに最大4つの同時受信用チャネルでこれらのモードの併用ができるトランスミッ ター出力スイッチ(2つの交互の送信用チャネル)を含んでいます。総消費電力は60W未満です。UAVベースおよび地 上ベースでの稼働を目的としてコンパクトなレーダハードウェアの実装が行われました。

表1:GAMMALバンドSARの仕様	
周波数範囲 使用中心周波数 中心周波数での波長 チャープ帯域 使用帯域 レンジ分解能 (@100 MHz BW) アジマス分解能 (@full SA) アジマス分解能 (@SA=250m, R=5km) 方式	1.2~1.4 GHz 1.325 GHz 22.6 cm 50~200 MHz 100 MHz 1.5 m $\leq 0.5$ m 2.3 m FM-CW
チャープ長 送信電力 送信用チャネル 受信用チャネル 上下方向のビーム幅 (3dB) アジマス方向のビーム幅 (3dB) 上下方向のポインティング角 レーダハードウェア構成部品一式 寸法	250 µs~8 ms 最大10W (使用時:5W) 2 (交互) 4 (同時) 40.0度 可変 (構成による) Pelicase 1450ケースに収納 長さ 406 mm 幅 330 mm 高さ 174 mm 7.65 kg

Pelicase 1450ケースに収納されたGAMMA-LバンドSAR。左上の写真に写っているのがコネクタ盤で、交互送信用チャネル2個、同時受信用チャネル4個、GNSSパッチアンテナ、LAN/イーサネット接続、電源(通常24V DC、送信中最大60W)用のソケットがあります。左下の写真のように Pelicaseを開くと、装置のコンピュータとFPGA 14 bit/チャネルデジタイザが現れます。GAMMA-LバンドSARの仕様については表1をご覧ください。

### SAR処理

FM-CWシステム(参考文献[1,4,5])に適合した時間領域逆投影(TDBP)法(参考文献[2,3])をCUDA/ANSI C言語(参 考文献[1])で実装することで、航空機または車載のL-バンドSAR画像を直接地図座標に結像できます。CUDA-GPU ベースのTDBP処理ソフトウェアは、GAMMAソフトウェアの別個のパッケージとして利用可能です。TDBP座標変換 ソフトウェアの稼働環境として推奨するのは、次のコンピュータハードウェアとオペレーティングシステム(OS)構成 です:NVIDIA TESLA GPGPUカード搭載のUbuntu Linuxワークステーション。他のハードウェア構成でも利用で きますが、こちらがGAMMAリモートセンシング社内で通常使用している推奨ハードウェア/OS構成です(Ubuntu



18.04、NVIDIA Tesla K20c GPU: CUDA Driver Version/Runtime Version 10.0/10.0、CUDA Capability: 3.5、グロ ーバルGPUメモリ: 4744 Mbyte、CUDAコア数 2496)。TDBPを使った処理アプローチでは、センサー軌道と照射領 域の地形がよく知られている場合、線形飛行軌道からの逸脱ーその多くは非線形センサー軌道ーを厳格な方法で 処理することができます。この処理の中で、結像されたシングルルック複素SAR画像が直接地図座標で得られま す。これらのSAR画像では、幾何学的位相成分がすでに除去されているため、これらのデータセットに基づいて差 分干渉画像が直接計算されます。

#### 地上用リピートパス干渉計にLバンドSARを採用した理由

現在の固定式地上レーダシステムは、良好なクロスレンジ解像度を確保するために比較的高い周波数(大部分がKuバンドまたはXバンドで作動)を使用していますが、LバンドSARシステムは、車載モード(またはUAV搭載モード)で運用している場合でも、クロスレンジ方向には0.5m未満からせいぜい数メートル程度の高解像度を得ることができます。クロスレンジ方向の解像度は、画像全体に対してレンジによって可変な合成開口長が得られるかどうかに依存することが多いですが、これもまた道路による移動範囲の制約(車載モード)や可能な飛行経路(航空機搭載/UAV)、地形などに依存します。

高周波固定システムの重要な利点および相補的とも言える性質は、Lバンドでの時間的非相関の減少です。視線 方向の変動に対する感度は低くなりますが、Lバンドの長い波長は、Kuバンドでの非相関時間が数分以下の自然 地形でもより長い干渉時系列を得られます。

センサー軌道のほぼ理想に近い繰り返し運動は、Lバンドレーダをレール上で作動させることで得られます。レ ールベースの設置のその他の利点は、短い間隔で大量の観測を長期間を自動化して取得できることです。これに は、レール長により決まるレンジ依存的なアジマス分解能がやや減少するという代償を伴います。現在は、長さ 2mのモジュラー部品からなるレールが利用可能で、全長12mとなるよう取り付け、運用が可能です。

#### 開発

Swiss Innovation Agency Innosuisse後援のチューリッヒ工科大学(ETH)との共同研究開発プロジェクトにおい て、複数の車載SARの実証試験を実施し、LバンドSARおよびINS/GNSS測定装置の設置、テスト、統合を行なった り、SAR画像フォーカシング(結像)とInSAR処理手法を検証しています。こうした研究開発活動により、さらなる適 用事例や使用事例の確立と実証を続けています。



## UAV搭載LバンドリピートパスInSARの実証試験

VTOL(垂直離陸および着地型)UAVは、特定のアプリケー ション向けに調整されたセンサー軌道を柔軟に計画したり 実現できる機動性に富んだ航空機搭載プラットフォームで す。例えば、地上から地形に直接のアクセスすることなく、 谷間の線形リピートパスセンサー軌道の飛行により、谷斜面 の視線方向の変動を計測できます。

Aeroscout社GmbHのVTOL UAV Scout B1-100機に搭載 されたGAMMA-LバンドSARを使用して、リピートパス干渉 試験が実施されました<sup>(1)</sup>。



Honeywell社HGuide n580 INS/GNSSナビゲーションシス テムを搭載したAeroscout社のVTOL UAV Scout B1-100 機とGAMMA-LバンドSAR。スイス、ヴォルフェンシーエッ センの試験場所にて。



実証試験当日の対象地域。右下のローカルGNSS観測基準点は、UAVの位置について高精度な後処理キネマティックGNSSソリューションが得られるよう配置されています。



UAV搭載LバンドSAR後方散乱強度画像のGoogle Earthビュー。 手前にUAVの飛行軌道が見られます。





空間基線ゼロ、時間基線3分に対するUAV搭載Lバンド差分干渉位相(左図)とコヒーレンス(右図)のGoogle Earthビュー。これら2回のリピート トラックの飛行管(飛行軌跡の空間的ズレ)は半径1m以内です。近距離の森林地帯とフォーショートニングが大きかった領域を除き、非常に高 いコヒーレンスが得られ、干渉位相も安定しています。

<sup>(1)</sup>注:実証試験は対象地域が雪で覆われた冬に実施されました。これは時間的非相関の点でリピートパス干渉試験には推奨されません。今回の実証試験の目的は、UAV搭載のGAMMA-LバンドSARデータの取得およびTDBP SAR処理システムにおける技術的なリピートパスInSARの能力を明らかにすることでした。



## 車載LバンドリピートパスInSARの実証試験

ここでは、2018年秋にGAMMA-LバンドSARで取得した高山氷河の流速により生じた視線方向の位相成分の リピートパス干渉位相の観測結果を示します。この実証試験では、GAMMA-LバンドSARシステムは車載モードで 稼働しています。高山氷河の複数のリピートパスSAR取得は、スイス中央部にある山岳道路のわずかにカーブし た部分に沿って走行する自動車から取得されました。車載のSARデータは、時間領域逆投影(TDBP)法により、数 値標高モデルを使って直接地図座標に結像されています。これらのジオコード済み複素SAR画像から、直接地図 座標の差分干渉画像を作成しています。自動車などの機動的なモバイルマッピングプラットフォームを利用した GAMMA-LバンドSARによるリピートパス干渉法の可能性が複数のデータ例で実証されました。



送信用アンテナ1台と受信用アンテナ3台を備えたLバンドSARシステム を車両に設置。山岳道路のわずかにカーブした区間を走行中にスタイ ン氷河のSARデータ取得を繰り返し実施しました。



スイス・スタイン氷河の試験場所のGoogle Earthビュー(左)。 車載LバンドSARから得られたジオコード済み強度画像(右)を Google Earthにオーバーレイした。



地図座標(北=上)におけるスタイン氷河と周辺領域の差分干渉画像。時間基線長はそれぞれ30分(左上)、135分(中央上)、152分(右上)、280分 (左下)、375分(中央下)、1020分(=17時間)(右下)。17時間の干渉画像は、1msのチャープ時間で取得した2つのデータ間で得られました。その ため、距離範囲の制限があります。他のすべての干渉画像は、2msのチャープ時間で取得したデータに基づいています。搬送周波数が1.325 GHz(波長22.6 cm)の場合、2πの干渉位相値は11.3 cmの視線方向の変位に換算されます。





差分干渉画像(左)とコヒーレンスの大きさ(右)。それぞれマルチルック強度画像と合成されています。3Dビューでのスタイン氷河と周辺地域の時間基線は1020分(17時間)です。可視化した画像の視点位置は、車載でのデータ取得が行われた道路区間上にあります。それ以外は、レーダの主な視線方向を見ています。

結果の概要は、参考文献[8]でもご覧いただけます。

# リニアレール上でのLバンドリピートパスInSAR観測

GAMMA-LバンドSARシステムのレールベース構成を使用すると、理想的に近い繰り返し性で、干渉SARデータを短い時間間隔で自律的に取得できます。



リピートパスInSAR自動観測用に、長さ12mのレールに取り付けられたGAMMA-LバンドSAR。レールは、各2mのアルミニウム材6本からでき ています。そのため、本装置は運搬可能で(ステーションワゴンやヘリコプタなど)、2名で現地に設置できます。レールベースのGAMMA-Lバン ドSARの隣には、比較用にKuバンドGAMMAポータブルレーダ干渉計(GPRI-II)が置かれています。



## 参考文献

- [1] Frey, O., Werner, C. L., and Wegmuller, U.: "GPU-based parallelized time-domain back-projection processing for agile SAR platforms," in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., July 2014, pp. 1132.1135.
  [Online]. Available: <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/6946629">https://ieeexplore.ieee.org/document/6946629</a>
- [2] Frey, O., Magnard, C., Ruegg, M., and Meier, E.: "Focusing of airborne synthetic aperture radar data from highly nonlinear flight tracks," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 47, no. 6, pp. 1844.1858, June 2009.
   [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/4812049
- [3] Frey, O., Meier, E., and Nüesch, D.: "Processing SAR data of rugged terrain by time-domain backprojection," in SPIE Vol. 5980: SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques X, 2005. DOI: <u>https://doi.org/10.1117/12.627647</u>
- [4] Ribalta, A.: "Time-domain reconstruction algorithms for FMCW- SAR," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 8, no. 3, pp. 396.400, May 2011.
- [5] Stringham, C. and Long, D. G.: "GPU processing for UAS-based LFM-CW stripmap SAR," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 80, no. 12, pp. 1107.1115, 2014.
- [6] Frey, O., Werner, C. L., Wegmuller, U., Wiesmann, A., Henke, D., and Magnard, C.: "A car-borne SAR and InSAR experiment," in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 2013, pp. 93.96 [Online]. Available: <u>https://ieeexplore.ieee.org/document/6721100</u>
- [7] Frey, O., Werner, C. L., Hajnsek, I., and Coscione, R.: "A car-borne SAR system for interferometric measurements: development status and system enhancements," in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 2018, pp. 6508.6511. [Online]. Available: <u>https://ieeexplore.ieee.org/document/8518840</u>
- [8] Frey, O., Werner, C. L., Coscione, R.: "Car-borne and UAV-borne mobile mapping of surface displacements with a compact repeat-pass interferometric SAR system at L-band," Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., July/Aug 2019, pp. 274-277.



## 詳細情報

追加情報は、<u>http://www.gamma-rs.ch</u>でご確認いただけます。

価格表や具体的な提案をご希望の場合は、sales@opengis.co.jpまでご連絡ください。

## 参考

GAMMA-LバンドおよびTDBP SARを用いた処理アプローチについて、特定の要素や機能をまとめた技術レポート、会議・雑誌論文が多数あります。これらの文書一覧には、各PDFファイルダウンロード用のリンクが記載されています。一覧は、<u>https://www.gamma-rs.ch/uploads/media/GAMMA\_L\_Band\_SAR\_References.pdf</u>からご確認いただけます。

# ガンマリモートセンシング株式会社

#### Gamma Remote Sensing AG

Urs Wegmüller, Charles Werner, Tazio Strozzi, Andreas Wiesmann

Worbstrasse 225, CH-3073 Gümligen, Switzerland phone: +41 31 951 70 05, fax: +41 31 951 70 08 gamma@gamma-rs.ch http://www.gamma-rs.ch/

#### ガンマ社日本代理店 株式会社 オープン GIS

〒130-0001 東京都墨田区吾妻橋 1-19-14 紀伊国屋ビル 1F

Tel: (03)3623-2851 Fax: (03)3623-3025 E-mail: sales@opengis.co.jp https://www.opengis.co.jp/