

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14747

研究課題名（和文）多重化された合成開口レーダのEnd-to-End適応的信号処理

研究課題名（英文）End-to-End Adaptive Signal Processing for Multiplexed Synthetic Aperture Radar

研究代表者

夏秋 嶺（Natsuaki, Ryo）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：60748888

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：合成開口レーダの観測システムの設計から災害発生時の情報処理に至るEnd-to-Endの研究を行い、所定の成果を挙げられた。観測システムの面ではアンビグイティ低減と観測範囲の拡大を目指した研究を行い新手法を用いたレンジアンビグイティの分離に成功したほか、外来妨害波の抑圧手法について新方式を提案した。これらはいずれも合成開口時の結像異常を元に再処理を行うシステムである。また、災害時の情報処理についても多時期のデータを利用した高精度な被害検知システムを考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

合成開口レーダは天候や時刻に左右されず地表を広域かつ高分解能に観測することが可能な能力を持っている一方で、通常の光学画像に比べ観測範囲が物理的に制約されるほか解析手法には多くの発展の余地があります。本研究ではこれらの物理的な制約を一定の条件の下で解消し従来より広域の観測を可能にしたほか、結像時の異常を元に解析の妨げとなる妨害波を検知し災害時のデータ解析についても従来より新手法を提案するなど、End-to-Endで研究成果を挙げました。

研究成果の概要（英文）：Researched the End-to-End of synthetic aperture radar system including development of system configuration and disaster monitoring system. We proposed a novel range ambiguity detection and removal method and radio frequency interference suppression method which uses anomaly in the focusing process. In addition, we proposed a novel method to detect disaster affected area using multi-temporal imageries. Those proposed methods outperform existing methods in accuracy and/or calculation speed.

研究分野：電気電子工学

キーワード：合成開口レーダ 計測工学 リモートセンシング 信号処理 干渉解析

1. 研究開始当初の背景

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) は、口径が小さなアンテナを移動させながら電波を送受信し、受信信号を時間積分することにより、より大きな口径のアンテナと同等の空間分解能を得る装置である。主に航空機や人工衛星に搭載され、空間分解能 3m 程度で数十キロメートルの範囲を観測可能である。SAR は一般的な光学画像と違い、位相や偏波の情報を扱えることから、偏波散乱特性を利用した土地被覆の分類や、地震や火山に伴う地殻変動を干渉法により数センチメートル単位で計測可能なほか、災害時の被災状況の判別にも用いられ、各国で積極的に研究が進められている。

近年、衛星 SAR の理論は多重化 (Multiplexing) による高分解能と広観測幅の両立を目指し発展している。具体的には一機の衛星に複数の受信機を搭載するマルチレシーバや DBF (いわゆる空間分割多重化) および送信するチャープパルスの変調関数をパルスごとに变化させるチャープ符号化 (いわゆる符号分割多重化) が挙げられる。これらの多重化により、一般にはトレードオフの関係にある観測幅と分解能の制約を受けず高分解能かつ広観測幅の SAR データ取得が可能となる。ただしその信号処理は、例えば衛星が電波の送受信の間静止している (Stop and Go approximation)、観測対象は偏波散乱特性が等方的な点散乱源である、電波伝搬経路は不変であるなど状況を近似している。しかし、高分解能化や軌道制御など観測機能の高度化に伴い、散乱源や電波伝搬経路の微小な変化が無視できなくなり、信号処理に必要なサンプリング定理を満たさなくなった結果として、SN 比の悪化や虚像が結像してしまう事例が多く報告されるようになった。こうした現象は虚像や雑音が局所的な現象であるために合成開口処理後の解析処理において初めて認識される場合もある。

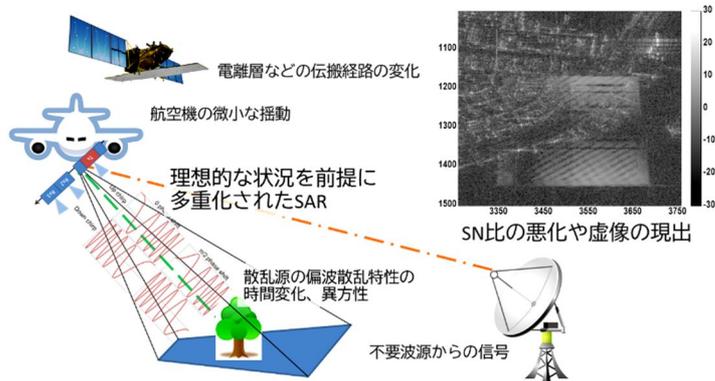


図 1 多重化された SAR における問題

また、SAR は電波の帯域を他のシステムと共有しているために常に外来妨害波 (不要波) の影響を受けている。

このように、SAR には様々な近似や外乱の影響がある一方で、その信号処理過程は合成開口から解析に至る順モデルを前提としたものである。すなわち、検知された異常がより手前の処理過程で除去できるかといったフィードバックがない。当然、個々の処理段階で独立した補正を行うのみで相互の連携は無く、処理ごとの自動ないし手動のパラメタ調整で対応されてきた。

2. 研究の目的

そこで、多重化された SAR を念頭に、例えば不要波のように受信信号そのものの異常であれば観測信号の再構成の段階で除去できるのであるから、解析処理で異常を検知したとしても再構成処理までさかのぼり対応したほうが解析処理の精度向上が望める。Stop and Go approximation をはじめとする従来の順モデルの合成開口を成立させる仮定を根本から見直し、それらの仮定を満足しない状況にあっても、解析処理で検知した異常をより上流の処理で解消することで影響の伝搬を低減させる、適応的な信号処理の体系を構築することが可能となる。このように、信号の適切な多重化により広範囲の観測を、外来不要波に強靱なシステムで高画質に合成開口し、従来よりも高精度に被災状況把握などデータ解析を行うことが、本研究の目的である。大別すると以下の 3 項目に分けられる。

- (a) 多重化された SAR の適応的信号処理理論の確立とシミュレーション
- (b) 既存の SAR データを利用した信号処理と解析の検証
- (c) ドローン搭載 SAR を利用した多重化された SAR の模擬と理論の実証

3. 研究の方法

(a) 多重化された SAR の適応的信号処理理論の確立とシミュレーション
この研究においては、信号の送受信や信号処理のシステムについて、理論的な検討を行い、その実現性や予想される性能についてシミュレーションをベースに研究を行った。

(b) 既存の SAR データを利用した信号処理と解析の検証
この項目においては、外来不要波や災害時の解析について、既存の観測データをもとに、新たに提案するシステムを模擬した条件での解析を行い、実用性や制度面での検証をおこなった。

(c) ドローン搭載 SAR を利用した多重化された SAR の模擬と理論の実証
商用のドローンと車載レーダを利用した無人航空機 SAR を作成し、合成開口処理と干渉処理の

解析実験をおこなった。これにより、比較的簡便な装置によって電波法や航空法といった制約の中でスケールモデルによる実験が可能となった。実験により提案手法が十分な性能を持つことを検証した。

4. 研究成果

本研究の成果は国内研究会 14 報、査読付き国際学会 8 報で発表・受理済みである。このほか、論文誌論文への投稿を行い、報告時点で査読中である。

(a) 多重化された SAR の適応的信号処理理論の確立とシミュレーション

この項目においては、送信するチャープパルスの符号化方法によってアジマスアンビギュイティが増強され、さらに従来の stop-and-go 近似では見過ごされてきた虚像が生じることをシミュレーションにより明らかにした。また、送信するチャープパルスの多重化が追加のアンビギュイティをもたらすこととそれを回避するための信号の送受信や信号処理のシステムについて、シミュレーションを中心に研究を行った。まず、古典的な単一パターンのチャープ信号のみで観測した場合のレンジアンビギュイティの分離法として、別の観測データからの信号を利用した。

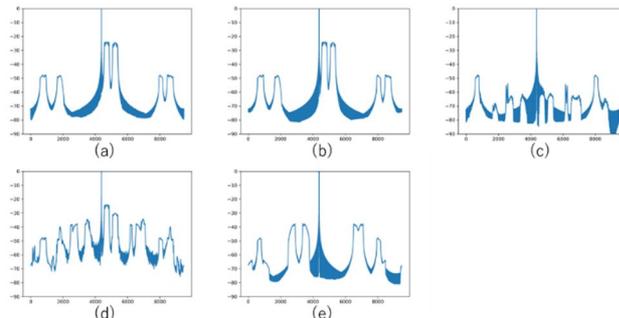


図 2 アジマスアンビギュイティの近似法および符号化法別による出現の様相[12](a)符号化なし(Stop-and-go 近似) (b)符号化なし(Intra-pulse 近似) (c) アップダウンチャープ法 (d) チャープシフト法 (e)APC 法

また、このような符号化による多重化を行わない場合には、レンジアンビギュイティとよばれる虚像が多数発生する。そこで、レンジアンビギュイティについて、受信信号の類似性を利用し、2回の観測から効率的に除去する手法を考案した。この手法はあるシーンにおけるレンジアンビギュイティ領域を別の時期に同一軌道から観測することによって、アンビギュイティ領域からの受信信号の教師データを作成し、これをもとにアンビギュイティを検知し除去するというものである。ALOS を利用した実データによる研究の結果、提案手法はレンジアンビギュイティのみを選択的に 10dB 以上抑圧できることを確認した。

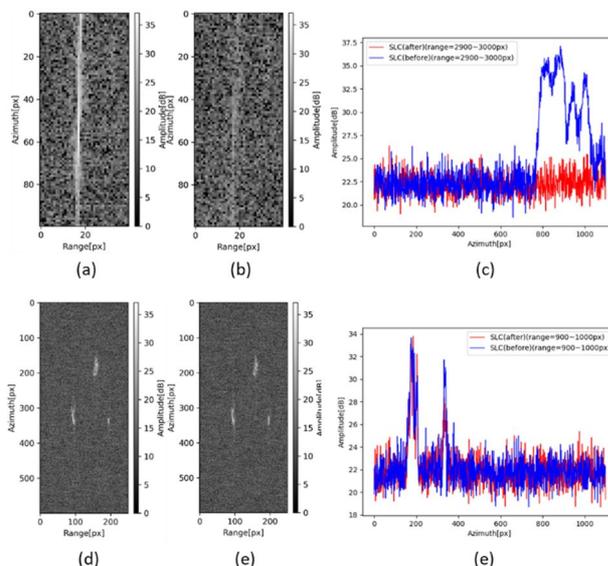


図 3 レンジアンビギュイティの発生と抑圧結果 (a) レンジアンビギュイティと (b) 提案手法による抑圧結果および (c) 振幅の差分、(d) 同一地域の船舶と (e) 提案手法による抑圧結果および (f) 振幅の差分

(b) 既存の SAR データを利用した信号処理と解析の検証

SAR においては外来不要波や災害時の解析について、既存の観測データをもとに、新たに提案するシステムを模擬した条件での解析を行い、実用性や精度面での検証をおこなった。

不要波の検知と抑圧においては、二偏波の類似性を利用した干渉信号の複素コヒーレンス情報を利用した検知と抑圧の手法を考案し、その精度が従来法と同等であり、かつ計算時間で圧倒的に優位であることを確認した。

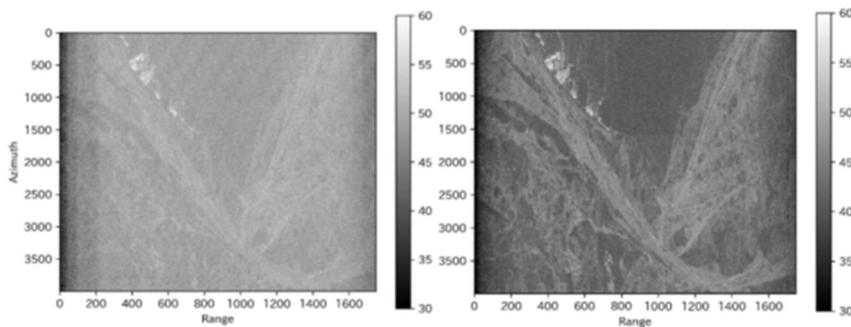


図 4 左：不要波の重畳した SAR 画像 右：提案手法による抑圧結果

また、信号処理の応用として SAR データを利用した災害発生時の被災範囲の抽出についても新手法を考案した。これは複素干渉コヒーレンスを複数の干渉ペアに対して計算し、それらを時間軸方向に重ね合わせる Temporally Stacked Interferometric Coherence (TSIC 法)とよばれるものである。干渉コヒーレンスの算出においては SAR 干渉画像へ平均化フィルタを適用するが、従来の干渉コヒーレンスを利用した変化検出法では、平均化フィルタの窓を小さくして高分解能を維持したまま解析を行う場合、Cramer-Rao の下限と呼ばれるバイアス誤差が生じ、検出精度の足かせとなっていた。提案手法ではコヒーレンス算出の際の平均化窓を空間方向だけでなく時間方向にも延長することによって空間分解能を悪化させずに高精度を発揮するというものである。2015 年に発生した関東・東北豪雨の衛星観測データに本手法を適用したところ、従来手法よりも誤検知が低下したことが明らかとなった。



図 5 TSIC 法による浸水領域の検知結果

(c) ドローン搭載 SAR を利用した多重化された SAR の模擬と理論の実証

商用のドローンと MIMO-FMCW 形式の車載レーダを利用した簡易な無人航空機 SAR を作成し、合成開口処理と干渉処理の解析実験をおこなった。これにより、比較的簡便な装置によって電波法や航空法といった制約の中でスケールモデルによる実験が可能となった。実験により制作したドローン搭載 SAR が理論値と 10%程度の誤差で同等な分解能を有する十分な性能を持つことを検証した。また、干渉解析についても十分な精度を有していることが実験的に明らかになった。ただし、ドローンの姿勢とレーダ装置の姿勢を後処理により補正する必要が判明したため、解析手法についての改良研究は今後の課題となった。



図 6 作成した車載レーダをもとにした観測装置（左）およびこれを搭載したドローン（右）

表 1 開発したドローン搭載 SAR の分解能

分解能	理論値 [m]	計測値 [m]
レンジ方向	0.91	1.01
アジマス方向	0.061	0.062

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 夏秋嶺
2. 発表標題 複数の受信アンテナを持つ合成開口レーダにおける受信信号パターンの類似性を利用した不要波検知の提案
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏秋嶺
2. 発表標題 複数の受信機やチャープ符号化を行う合成開口レーダで生じるアジマスアンビギュイティを抑制する方法の検討 ~ ALOS-2を利用した実験 ~
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 154, SANE2021-28, pp. 32-36, 2021年8月.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西館嘉郎、廣瀬明、夏秋嶺
2. 発表標題 合成開口レーダの複素干渉画像の時間軸方向の重ね合わせによる浸水検知
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 306, SANE2021-67, pp. 23-28, 2021年12月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏秋嶺
2. 発表標題 複数の受信アンテナを持つ合成開口レーダにおける時間領域と周波数領域での不要波検知
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 16, SANE2021-8, pp. 44-48, 2021年5月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Roger Oliva, Paolo de Matthaëis, Ryo Natsuaki
2. 発表標題 Development of an IEEE Standard to Assess Interference on Remote Sensing Frequency Bands
3. 学会等名 2022 IEEE Space Hardware and Radio Conference (SHaRC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Natsuaki, R Sugimoto, C Tsutsumi, R Nakamura
2. 発表標題 Emulation of A SAR Interferogram from The Past Satellites for The Present Events
3. 学会等名 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Natsuaki
2. 発表標題 POLARIMETRIC PROPERTIES OF RFI IN SAR RAW DATA
3. 学会等名 RFI 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Natsuaki and Pau Prats-Iraora
2. 発表標題 Radio Frequency Interference Detection for Multi-Receiver Synthetic Aperture Radar Based on Interferometric Analysis of Raw Data
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020), 3D1.3, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏秋嶺
2. 発表標題 合成開口レーダにおけるチャープ符号化方式ごとのアンビギュイティ抑制効果の評価
3. 学会等名 信学技報, vol. 120, no. 250, SANE2020-33, pp. 37-42, 2020年11月
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 夏秋嶺
2. 発表標題 合成開口レーダのチャープ符号化方式ごとのIntra-pulse 効果によるアジマスアンビギュイティ影響評価
3. 学会等名 信学技報, vol. 120, no. 221, EMT2020-36, pp. 49-53, 2020年11月.
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 夏秋嶺
2. 発表標題 福徳岡ノ場 2021年新島に対するALOS-2 / PALSAR-2干渉解析
3. 学会等名 JpGU 2022 STT39-12, 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山川凌太郎、廣瀬明、夏秋嶺
2. 発表標題 ドローン搭載のMIMO-FMCWレーダを用いた干渉SARとその検証
3. 学会等名 信学技報, vol. 122, no. 248, SANE2022-55, pp. 29-34, 2022年11月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 魚住昂央、廣瀬明、夏秋嶺
2. 発表標題 2偏波の複素振幅情報を利用したSARにおけるRFI検出手法
3. 学会等名 信学技報, vol. 122, no. 256, EMT2022-52, pp. 47-52, 2022年11月.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 夏秋嶺、工藤雷己、廣瀬明
2. 発表標題 類似性を利用した合成開口レーダのレンジアンビギュイティ抑圧
3. 学会等名 信学技報, vol. 122, no. 312, SANE2022-67, pp. 29-32, 2022年12月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Natsuaki and A. Hirose
2. 発表標題 Polarimetric Analysis of RFI in L-Band SAR System
3. 学会等名 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 5145-5148 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Raito Suzuki, Ryo Natsuaki, Akira Hirose
2. 発表標題 Extending observation coverage of SAR by separating range ambiguous signals using PN-sequences
3. 学会等名 IGARSS 2023 (Accepted) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Natsuaki, Ryu Sugimoto, Masanobu Shimada, Chiaki Tsutsumi, Ryosuke Nakamura
2. 発表標題 Urban damage detection using temporally stacked Synthetic Aperture Radar Interferometric Coherence
3. 学会等名 IGARSS 2023 (Accepted) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Uozumi, Akira Hirose, Ryo Natsuaki
2. 発表標題 RFI detection using cross-polarization coherence for dual-and full-polarimetric Synthetic Aperture Radar
3. 学会等名 XXXVth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2023) (Accepted) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関