

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6333196号
(P6333196)

(45) 発行日 平成30年5月30日(2018.5.30)

(24) 登録日 平成30年5月11日(2018.5.11)

(51) Int.Cl.

G O 1 S 13/90 (2006.01)

F 1

G O 1 S 13/90 191

請求項の数 9 外国語出願 (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2015-34006 (P2015-34006)
 (22) 出願日 平成27年2月24日 (2015. 2. 24)
 (65) 公開番号 特開2015-169657 (P2015-169657A)
 (43) 公開日 平成27年9月28日 (2015. 9. 28)
 審査請求日 平成29年10月24日 (2017. 10. 24)
 (31) 優先権主張番号 14/202, 449
 (32) 優先日 平成26年3月10日 (2014. 3. 10)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 000006013
 三菱電機株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
 (74) 代理人 100110423
 弁理士 曽我 道治
 (74) 代理人 100111648
 弁理士 梶並 順
 (74) 代理人 100122437
 弁理士 大宅 一宏
 (74) 代理人 100147566
 弁理士 上田 俊一
 (74) 代理人 100161171
 弁理士 吉田 潤一郎
 (74) 代理人 100161115
 弁理士 飯野 智史

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 エリアの3D画像を生成する方法およびエリアの3D画像を生成するシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

エリアの3D画像を生成する方法であって、
 前記3D画像は、合成開口レーダ(SAR)画像であり、
 前記方法は、

1つまたは複数のSARシステムを用いて前記エリアから複数のデータセットを取得するステップであって、各SARシステムは、少なくともペアの平行なベースラインと、複数のパルス繰り返し周波数(PRF)とを有し、各ベースラインの所定のPRFは他のPRFと異なるように前記複数のPRFからランダムに選択される、ステップと、

前記データセットを登録するとともに整列し、整列したデータセットを作成するステップと、

前記整列したデータセットに圧縮センシングに基づく方法を適用し、前記エリアに対応する前記3D画像を生成するステップと、

を備え、

前記ステップは、プロセッサで実行される、
 エリアの3D画像を生成する方法。

【請求項2】

前記データセットは、各ベースラインにおいて一様にサンプリングされる、
 請求項1に記載の方法。

【請求項3】

10

20

前記ベースラインは、互いに平行である、
請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記データセットは、複数の S A R システム、または単一 S A R システムの複数のパスから取得される、

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記複数のベースラインは、ランダムに空間的に分布する、
請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

全ての前記データセットが処理される、
請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 7】

前記圧縮センシングに基づく方法は、反復再構成方法である、
請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

エリアの 3 D 画像を生成するシステムであって、
前記 3 D 画像は、合成開口レーダ（S A R）画像であり、
前記システムは、

20

前記エリアから複数のデータセットを取得するように構成された 1 つまたは複数の S A R システムであって、各 S A R システムは、少なくともペアの平行なベースラインと、複数のパルス繰り返し周波数（P R F）とを有し、各ベースラインの所定の P R F は他の P R F と異なるように前記複数の P R F からランダムに選択される、1 つまたは複数の S A R システムと、

前記データセットを登録するとともに整列し、整列したデータセットを作成し、前記整列したデータセットに圧縮センシングに基づく方法を適用し、前記エリアに対応する前記 3 D 画像を生成するように構成されたプロセッサと、

を備えた、エリアの 3 D 画像を生成するシステム。

【請求項 9】

エリアの 3 D 画像を生成するためのコンピュータプログラムを記憶した非一時的なコンピュータ可読媒体であって、

30

前記 3 D 画像は、合成開口レーダ（S A R）画像であり、
前記コンピュータプログラムは、

1 つまたは複数の S A R システムを用いて前記エリアから複数のデータセットを取得するステップであって、各 S A R システムは、少なくともペアの平行なベースラインと、複数のパルス繰り返し周波数（P R F）とを有し、各ベースラインの所定の P R F は他の P R F と異なるように前記複数の P R F からランダムに選択される、ステップと、

前記データセットを登録するとともに整列し、整列したデータセットを作成するステップと、

前記整列したデータセットに圧縮センシングに基づく方法を適用し、前記エリアに対応する前記 3 D 画像を生成するステップと、

40

をプロセッサに実行させる命令のセットを備え、
前記ステップは、プロセッサで実行される、
非一時的なコンピュータ可読媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、包括的には合成レーダシステムに関し、より詳細には、3 次元断層イメージングシステムに関する。

【背景技術】

50

【0002】

合成開口レーダ（SAR）システムは、移動プラットフォームに配置されたアンテナの動きを利用して大きな仮想開口部を合成し、結果として高分解能イメージングをもたらす。異なる空間口ケーションにおける各仮想配列は、ベースラインを形成する。単一パス（单一ベースライン）SARシステムは、対象エリアの2次元（2D）距離方位反射率を高度分解能なしでイメージングすることが可能である。しかしながら、エリアの3次元（3D）地形特徴等の3D構造は保持されない。

【0003】

2D画像は、本質的には3D反射率空間の2D距離方位イメージング平面への投影である。この投影によって、いくつかのアーチファクトが生じる場合がある。例えば、レイオーバアーチファクトでは、異なる仰角を有するいくつかの地形パッチが同じ距離方位分解能セルにマッピングされる。非特許文献1を参照されたい。10

【0004】

シャドーイングアーチファクトでは、ある特定のエリアが、照射経路に別の構造があることに起因してSARシステムにとって不可視である。これらのアーチファクトは、たとえ干渉SAR技法を用いたとしても、単一パスで解像することができない。

【0005】

Terr a SAR - XおよびCOSMO - Sky medの人工衛星の打ち上げによって、3Dイメージングが可能になった。これらのシステムは、異なるベースラインおよび時間において収集された複数のパスからの複素SAR画像のスタックを利用し、散乱オブジェクトの3D口ケーションおよび動き情報を捕捉する3D画像を形成する。非特許文献2を参照されたい。20

【0006】

単一レーダプラットフォームに搭載されたアンテナ101の複数のベースライン配列を用いて、3D高度、距離および方位空間に関する3D画像を生成する従来の3D SARシステムが図1に示される。この図は、異なる高度の点散乱体102を示す。

【0007】

図2は、図1のシステムの従来の3Dイメージングプロセスを示す。データ201は、各ベースライン（1, ..., N）101で取得される。2D SARイメージング210は、各データ201に独立して適用され、2D画像（I₁, I₂, ..., I_N）215を構成する。画像は、登録および整列され（220）、その後、3D画像再構成（230）によって3D画像240が取得される。30

【0008】

3D画像は、散乱体が同じ距離方位口ケーションに存在する場合でも、追加の高度次元を用いて、高度に沿って複数の散乱体を分けることができる。しかしながら、3D画像は、いくつかのトレードオフを要する。第1に、プラットフォームは、複数のベースラインにおいて画像を取得するために、対象エリアにわたっていくつかのパスを行う必要がある。これにより、データ収集は、時間および非常に高い費用を要するものとなる。第2に、高度分解能は、仰角開口の小ささに起因して、距離および方位の分解能に比べて大幅に劣る。この仰角開口は、現代のSARセンサにおいて、例えば直径約500メートルの緊密な（tight）軌道チューブ（orbital tube）として知られる。40

【0009】

高度分解能は、圧縮センシング（CS）に基づく手法を用いて改善することができる。非特許文献3を参照されたい。このCS手法は、複数のベースラインと、単一SARプラットフォームの単一PRFとを用いる。この方法では、2D距離方位画像は、ベースラインごとに再構成される。そして、圧縮センシングに基づく方法が高度分解能を改善するために用いられる。この方法は、2D距離方位ピクセルごとのスパース性しか考慮していない。

【先行技術文献】**【非特許文献】**

【0010】

【非特許文献1】Gini他「Layover solution in multibaseline SAR interferometry」IEEE Trans. Antennas and propagation, vol. 38(4), pp. 1344-1356, Oct 2002.

【非特許文献2】Fornaro他「Three-dimensional focusing with multipass SAR data」IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 41(3), pp. 507-517, March 2003.

【非特許文献3】Zhu他「Tomographic SAR inversion by L1-norm regularization - the compressive sensing approach」IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 48(10), pp. 3839-3846, Oct 2010. 10

【発明の概要】

【0011】

本発明の実施形態は、合成開口レーダ(SAR)イメージングのための圧縮センシング(CS)に基づく方法を提供する。本方法は、取得する必要のある生データの総量を減らし、高度の分解能を上げる。特に、本実施形態は、複数の平行なベースラインにおいて収集されたSARデータを方位高度平面において用いる。高度の分解能は、従来の3D SARシステムのものと比べて実質的に高い。その増加量は約4倍である。 20

【0012】

各ベースラインの高度は、利用可能な高度空間においてランダムに分布する。さらに、各ベースラインにおけるアンテナ配列は、一定パルス繰り返し周波数(PRF)またはパルス繰り返しレート(PRR)を用いる。これらは、時間単位(例えば、秒)ごとのパルス数である。各ベースラインのPRFは異なる。したがって、複数のベースラインによって、データ取得に柔軟性がもたらされる。例えば、データは、単一SARプラットフォームの複数のパスにおいて取得することもできるし、様々なSARプラットフォームから取得することもできる。全てのベースラインが空間領域に整列および配置されるとすると、CSに基づく反復イメージング方法を用いることで、マルチベースラインデータを用いて高分解能3D反射率マップを生成することができる。 30

【0013】

実施形態はいくつかの利点を提供する。特に、CSに基づく方法を用いることで、非常に少ない数のベースラインのみを用いて3D反射率を生成することができる。これにより、データ収集に要する時間および費用が削減される。第2に、異なるPRFのデータと一緒に処理することで、単一SARプラットフォームの複数のパスからのみならず、複数のレーダプラットフォームからのデータも融合することが可能になる。複数のプラットフォームによって、単一SARプラットフォームに比べてはるかに大きな仮想仰角開口を形成することが可能になる。その結果、非常に高い高度分解能、例えば、従来の3D SARシステムの4倍の高度分解能が得られる。 40

【0014】

本方法は、3D断層SARイメージングおよびCSに基づくSARイメージングに関するが、新たな寄与をなすものである。実施形態は、従来技術とは異なり、マルチベースラインデータにおいて複数の異なるPRFを可能にする。これにより、データソースが単一SARプラットフォームから複数のプラットフォームに拡張され、はるかに大きな仰角開口が可能になる。さらに、実施形態は、取得された生データに対し直接動作する、新たなCSに基づく反復イメージング方法を提供する。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】従来の断層合成開口レーダシステムの概略図である。 50

【図2】従来のマルチベースライン合成開口レーダシステムのブロック図である。

【図3】本発明の実施形態に係る、圧縮センシングに基づく3D合成開口レーダシステムの概略図である。

【図4】本発明の実施形態に係る、図3の複数の合成開口レーダシステムを用いて3D画像を生成するシステムおよび方法のブロック図である。

【図5A】従来のイメージングの点散乱体を示す図である。

【図5B】本発明の実施形態に係る、CSに基づくイメージングの点散乱体を示す図である。

【図6A】従来技術の、図5Aの再構成を示す図である。

【図6B】本発明の実施形態に係る、図5Bの再構成を示す図である。 10

【発明を実施するための形態】

【0016】

図3および図4に示すように、本発明の実施形態は、合成開口レーダ(SAR)3D画像を生成する方法を提供する。本方法は、複数のベースライン301および複数のパルス繰り返し周波数(PRF)においてデータセットを取得する。複数のベースラインは、対象エリアにわたっていくつかのパスを行う単一プラットフォーム、または同じエリアにわたってパスする複数の異なるプラットフォームを用いて確立することができる。

【0017】

この説明において、点散乱体302とともに、3D空間に配置された3Dオブジェクトを考慮する。空間において高度方向に沿ってランダムに分布する、合計70本のベースラインを考慮する。これらのベースラインは、高度に沿って均一な間隔で置かれた281本の可能なベースラインから選択される。図3を参照されたい。ベースラインの合計本数は、従来の3D SARシステムにおけるものと比べて実質的に少ない。 20

【0018】

本シミュレーションにおいて、従来の3D SARシステムに必要とされるベースラインの全体本数の25%しか必要としない。その上で、高度分解能を約4倍に上げることができる。

【0019】

各ベースラインにおいて、SAR生データセットは一定PRFで取得される。一方、異なるベースラインに関して、対応するPRFは、他のPRFと異なるようにランダムに選択される。特に、全てのベースラインからのデータセットは、ベースPRFから始まって、ランダム整数値によってダウンサンプリングされる。つまり、各PRFは、ベースPRFの一部であり、ダウンサンプリングレートは、セット{2, 3, 4, 5}からランダムに選択される。全てのデータセットは完全に整列しているとみなす。 30

【0020】

2つの異なる手法を比較する。第1の従来手法は、それぞれが異なるPRFを有する70本のベースラインでの削減されたデータ収集と、従来のイメージング方法とを用いる。本発明に係る手法では、削減されたデータ収集と、本発明のCSに基づくイメージング手法とを用いる。従来の3Dイメージングにおいては、データをアップサンプリングし、欠落データをゼロで補うことによって、近距離レンジマイグレーションイメージング手順(near-field range migration imaging procedure)を用いる。この手順は、取得されたデータから高速のビーム形成結果を生成し、取得演算子の逆を実施する。 40

【0021】

CSに基づくイメージングにおいては、シーンのスパース性を利用する反復手順を用いて欠落データを補い、その後、高速マイグレーションイメージングを行う。

【0022】

図4に示されるように、データセット401は、SARシステムのセット{1, . . . , N}から取得される。上述したように、データセットは、単一システムの複数のパスにおいて取得することができる(405)。ここで、この説明において、各パスは独立した 50

データセット、または異なる S A R システムによる複数のパス、または単一システムおよび独立システムの複数のパスの何らかの組合せを生成する。

【 0 0 2 3 】

データセット401は、登録および整列され(410)、整列したデータセット415が生成される。整列の後、整列した複数のベースライン、複数のPRFデータセット415に、CSに基づく3D画像再構成が直接適用され(420)、3D SAR画像430が取得される。

【 0 0 2 4 】

図5 Aは、ダウンサンプリングに起因する方位および高度におけるエイリアシング501が見られる場合のある、従来のイメージングの点散乱体を示す。

【 0 0 2 5 】

図5Bは、本発明の実施形態に係る、CSに基づくイメージングの、エイリアシングが除かれた点散乱体を示す。

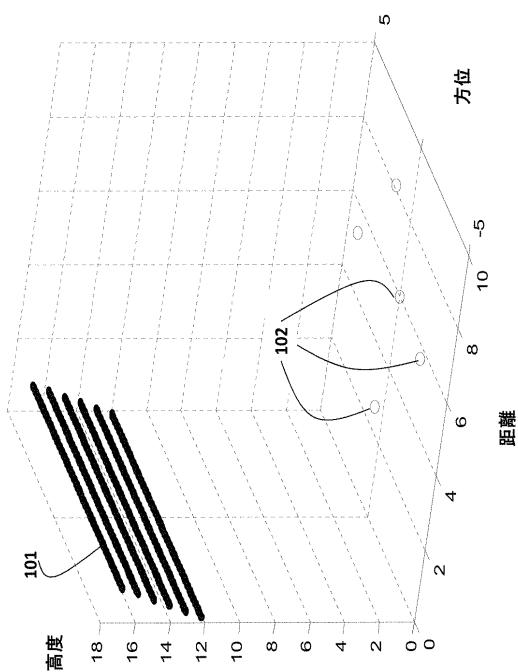
【 0 0 2 6 】

図 6 A は、方位および高度の双方で大幅な劣化および低分解能を有する図 5 A の再構成を示す。

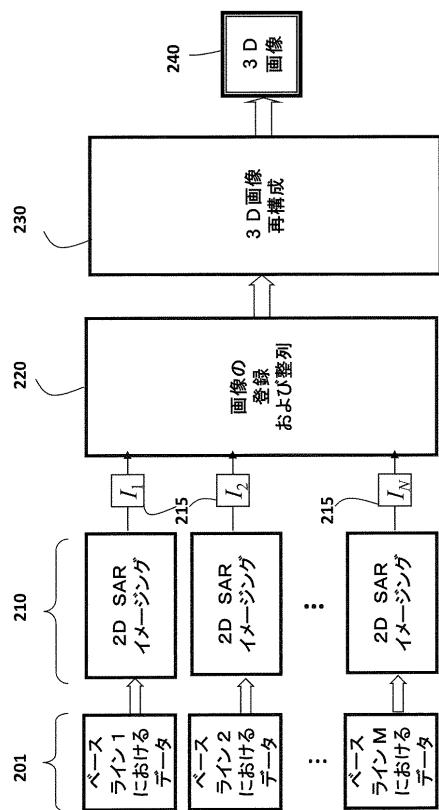
【 0 0 2 7 】

図 6 B は、図 5 B の再構成を示す。図示されるように、CSに基づく手法は、利用可能なデータが限られているのにかかわらず、再構成を大幅に改善する。実際、復元は全ての利用可能なデータを用いる従来のイメージングに非常に近い。

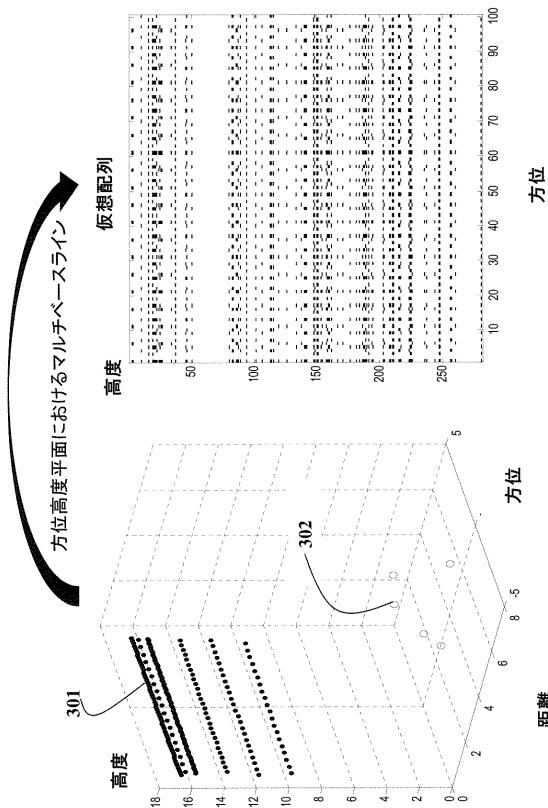
〔 1 〕



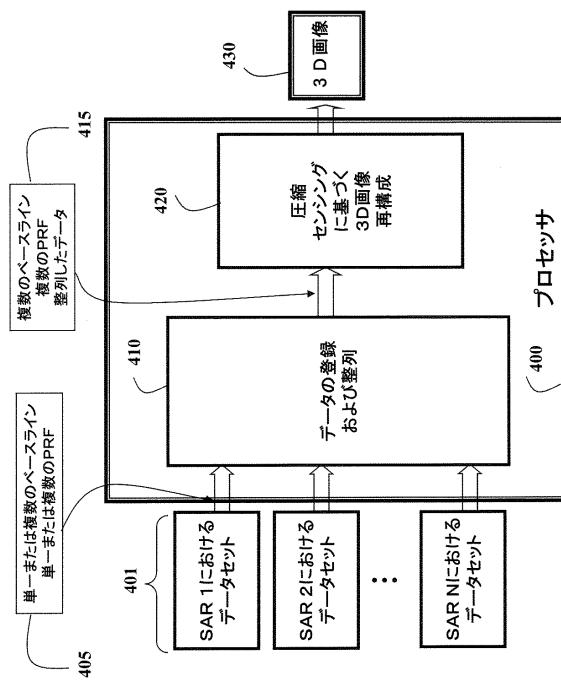
(2)



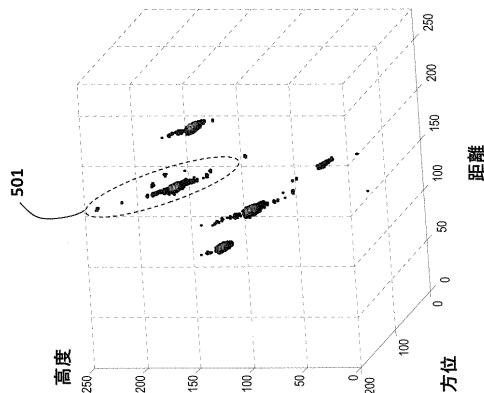
【図3】



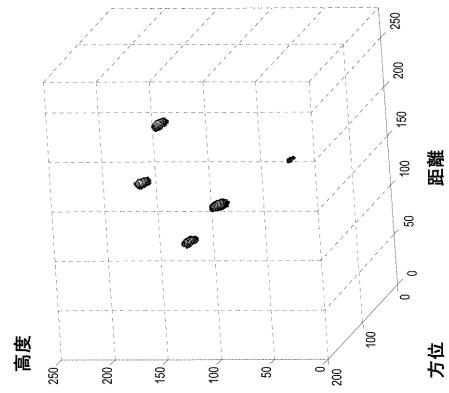
【図4】



【図5A】



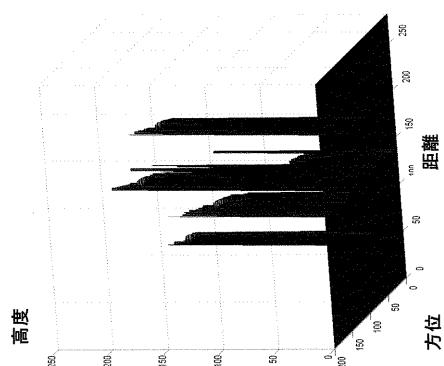
【図5B】



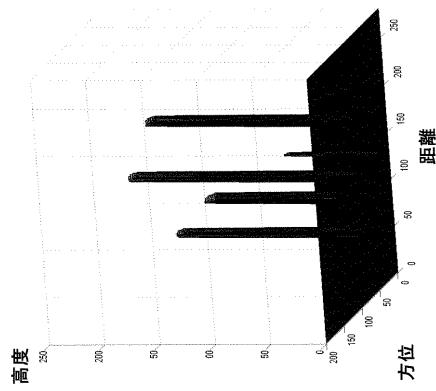
(8)

JP 6333196 B2 2018.5.30

【図 6 A】



【図 6 B】



フロントページの続き

(74)代理人 100194939

弁理士 別所 公博

(72)発明者 デホン・リウ

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、プロードウェイ 201、ミツビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

(72)発明者 ペトロス・ティー・ボウフォウノス

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、プロードウェイ 201、ミツビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

審査官 山下 雅人

(56)参考文献 米国特許第05659318(US, A)

米国特許出願公開第2012/0250748(US, A1)

特開2012-215568(JP, A)

特開2014-182124(JP, A)

特表2016-507718(JP, A)

特開2016-130726(JP, A)

特開2016-136142(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01S 7/00 - G01S 7/42

G01S 13/00 - G01S 13/95