

合成開口レーダ向け 圧縮センシング技術

星野 起寛* 岡田 祐***
Dehong Liu**
原 照幸*

Compressive Sensing Technology for Synthetic Aperture Radar

Takehiro Hoshino, Dehong Liu, Teruyuki Hara, Yu Okada

要 旨

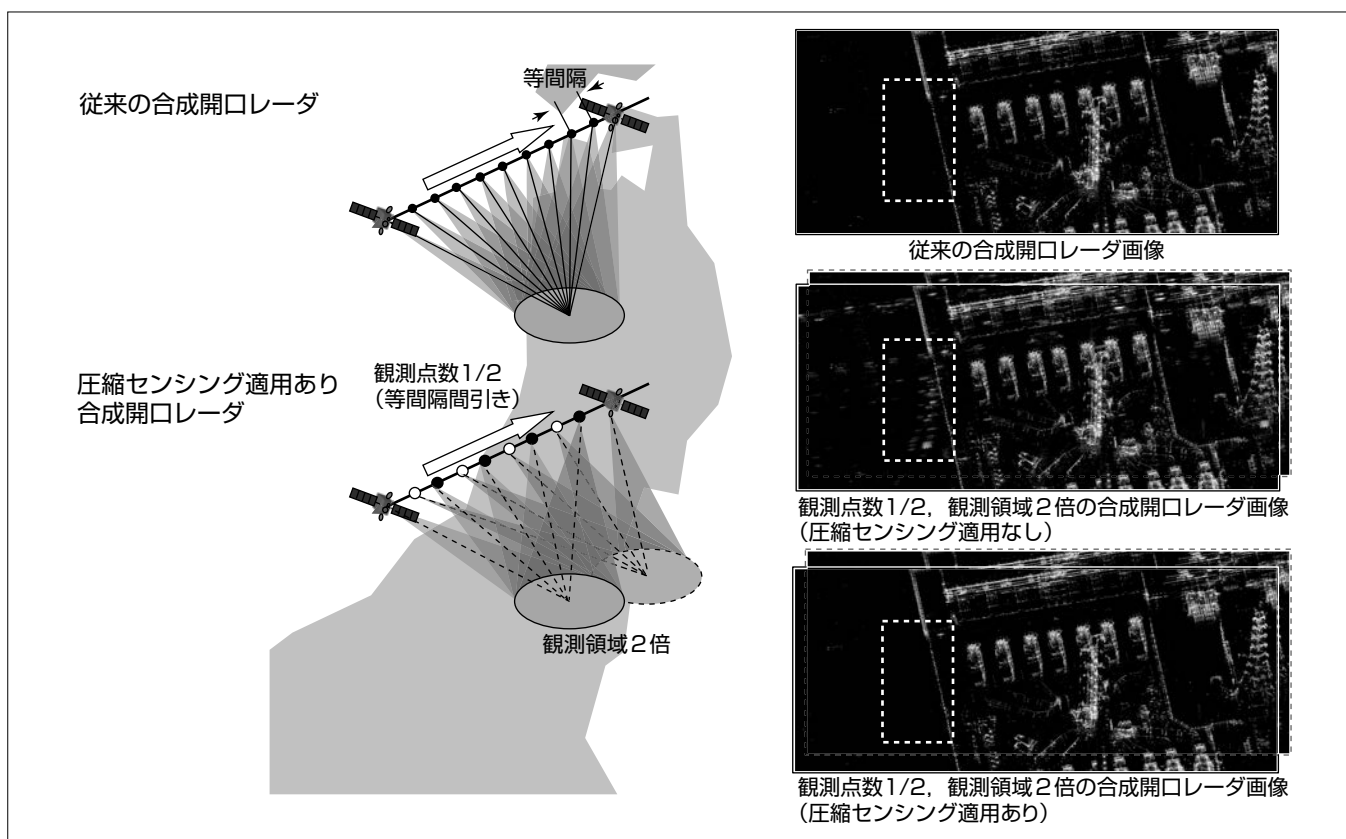
衛星や航空機に搭載し、昼夜天候を問わずに地表面を観測するセンサとして合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)がある。合成開口レーダは広域観測に適するが、総観測時間短縮のために観測領域の更なる拡大が求められている。画質を劣化させずに観測領域を拡大する広域高分解能化の要求があり、三菱電機が開発した衛星だいち2号では、レーダ用の受信アンテナを二つに増やすことで広域高分解能を達成した。しかしアンテナを二つに増やすことは、すなわちダウンリンクされるデータ量もまた2倍になることを意味している。

昨今、広域高分解能化につれてデータダウンリンクの容

量逼迫(ひっばく)が課題となっており、ダウンリンクにかかるデータ量の圧縮が求められている。データ量圧縮が可能な技術の一つに圧縮センシングと呼ばれる2006年から開拓された技術がある。

三菱電機では、今回、合成開口レーダ向けの圧縮センシング技術を開発した。従来に比べてデータ量を半分にした場合でもデータ再構成が可能であることを電波暗室実験及び航空機SAR実験で確認した。特に、航空機SAR実験では偽像レベルが9.6dB抑圧されることを確認した。

この技術はSARセンサの小型・低コスト化等への活用が見込まれ、省資源な宇宙開発への貢献が期待できる。



衛星搭載型合成開口レーダ向け圧縮センシング技術のコンセプト

圧縮センシングをSAR画像に適用することで、2倍の観測領域の観測が単一の観測領域のデータ量で実施可能となる。従来、アンテナ数及びデータ量を2倍にすることで2倍の観測領域を広域高分解能で観測していた。今回、アンテナ数2倍でデータ量をそのままにした場合に相当するSAR画像でも圧縮センシングを適用することで、2倍のデータ量で観測した場合と遜色ない画質が得られることを確認した。

1. ま え が き

衛星や航空機に搭載し、昼夜天候を問わずに地表面を観測するセンサとして合成開口レーダ(SAR)がある。SARは広域観測に適するが総観測時間短縮のために観測領域の拡大が求められている。画質を劣化させずに観測領域を拡大するため、三菱電機が開発した衛星 だいち 2号ではレーダ用アンテナを二つに増やして広域高分解能を達成した⁽¹⁾。しかしアンテナを二つに増やすことは、すなわちダウンリンクされるデータ量も2倍になる。

広域高分解能化に伴いデータダウンリンクの容量逼迫が課題となっており、ダウンリンクデータ量の削減も求められている。データ量削減が可能な技術として圧縮センシングと呼ばれる技術が2006年から開拓された⁽²⁾。

三菱電機では、今回、SAR向けの圧縮センシング技術を開発した⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。従来に比べてデータ量を半分にした場合でもデータ再構成が可能であることを電波暗室実験及び航空機SAR実験で確認した。

2. 圧縮センシングの原理

2.1 サンプルング定理

圧縮センシングは、サンプルング定理によるデータ量の限界を突破する技術の一つである。サンプルング定理とは、ある周波数までのデータを忠実に再現する場合、その2倍の周波数でサンプルングすればよいという定理である。例えば音楽CDのサンプルング周波数は44.1kHzであるが、これは人の可聴域(22kHz以下)を再現するためである。これに対して圧縮センシングは44kHz未満のサンプルングでも22kHzのデータを再構成しようとする手法である。図1にサンプルング定理を満たさない場合に周波数の同定ができない例を示す。実線は真の波動を表し、丸点はサンプルングで観測された信号を示す。破線は真の波動と同じ観測値を持つ高い周波数の波動(偽像)である。丸点の観測では実線と破線のどちらが真の波動か分からない。

2.2 ランダムサンプルング

図1の問題に対して、一般に圧縮センシングではサンプルングをランダム化する方法がとられる。図2にランダムサンプルングした場合の様子を示す。丸点での観測で実線と破線を区別して実線が真の波動であることが分かる。ランダムサンプルングの観測値をフーリエ変換して周波数領域で見ると、図1で現れていた高周波の偽像成分は拡散されて小さくなる。これを偽像のコヒーレンスが低下したと言う。

さらに圧縮センシングでは、求めるべき波動の数が疎(スパース)であるとの前提で解を抽出する。言い換えると、実際の観測では周波数領域で複数の成分が現れるが、これらの成分の数が少なく、まばらに分布しているとの前提である(多くの場合この前提は良い近似である)。

2.3 SAR向け圧縮センシング

SARでは図1、図2の時間領域の横軸が軌道上の観測位置(要旨の図の観測点)、縦軸が地上の電波反射源から来る電波の振幅に相当する。観測中心方向からの電波は変化が緩やかで実線に相当し、観測中心から離れた反射源からの電波は変化が急峻(きゅうしゅん)で破線に相当する。観測点が少ない場合は実線と破線の区別が付かない。仮に実在する電波が観測中心からの電波(実線)だけだとしても、破線の電波に相当する方向に偽像が発生することになる。

ランダムサンプルングが一つの解決手段であるが、実はSARの場合、観測中心から離れた反射源は観測点からの距離変化が一樣ではないため、その電波は観測点に対して図3の破線のように変化する。したがって等間隔サンプルングでも実線と破線を区別することが可能である。これは偽像成分(破線)のコヒーレンスが低下したと言え、フーリエ変換後の偽像の強度レベルが下がる。さらに2.2節で述べたように求める解はスパースであるとの前提で解(SAR画像)を抽出する。これが今回開発したSAR向け圧縮センシングの原理である。

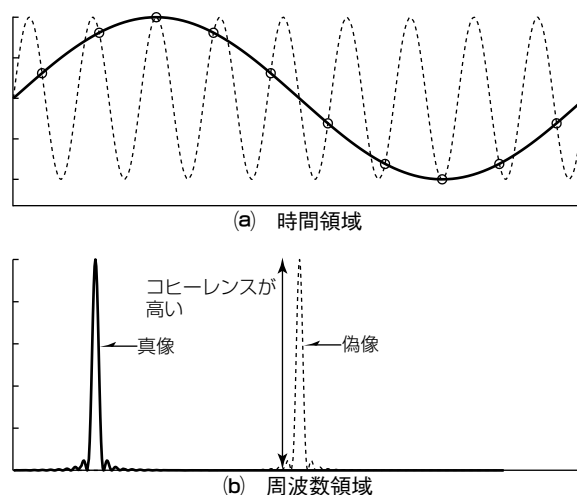


図1. 二つの波動のコヒーレンスが高い状態

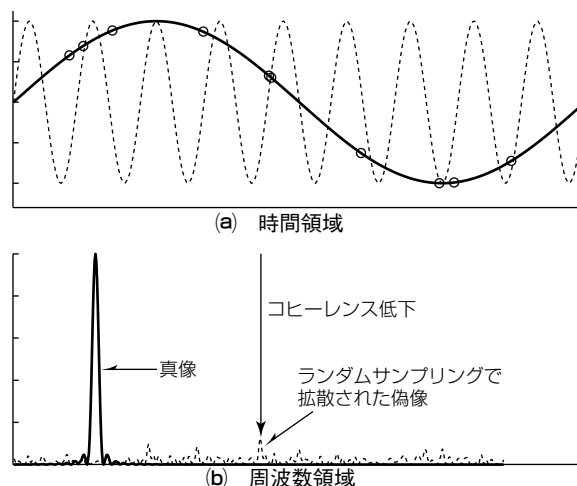


図2. ランダムサンプルングによるコヒーレンス低下

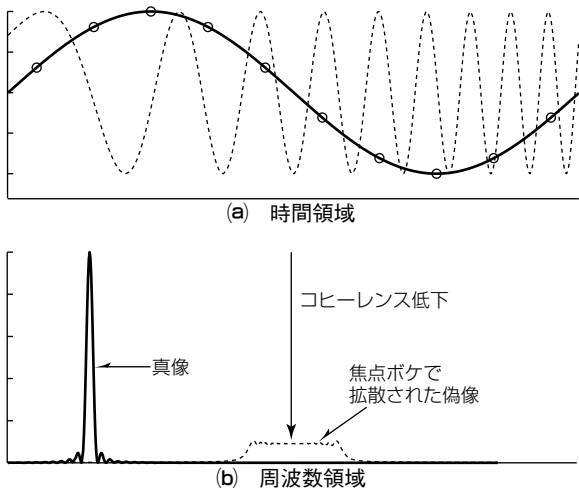


図3. SARでのコヒーレンス低下

3. 実験による原理検証

3.1 電波暗室Ka帯SAR実験での原理検証

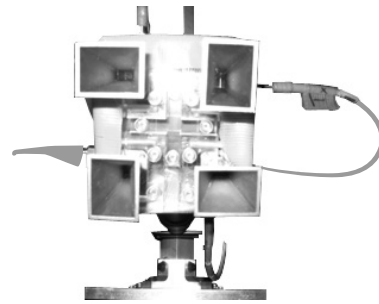
この節では電波暗室内での実験によるランダムサンプリングによる圧縮センシングの原理検証結果を述べる。実験では衛星や航空機に搭載したSARを模擬するため実験用レーダを少しずつ動かして計測した。表1に実験の諸元を示す。図4は電波暗室実験用レーダ及び観測対象の三面コーナーフレクタである。四つのKa帯ホーンアンテナを用いており、今回は実験用レーダ(図4(a))の左上のアンテナを送信用、左下のアンテナを受信用として用いた。ここでは、サンプリング率を、パルス繰り返し周波数をドップラー帯域幅で除算した値として定義する。1.0以上でサンプリング定理を満たすことに相当する。図5(a), (b), (c)は、それぞれサンプリング率7.0, 1.4, 0.5でのランダムサンプリング時の圧縮センシングによる再構成の前後の様子を示している。ランダムサンプリングでは、サンプリング率が1.0以上、すなわち平均のサンプリング周波数がサンプリング定理を満たす場合でも、局所的にはサンプリング定理を満たさないために偽像を生じる様子が見取れる。特に図5(c)から、サンプリング率0.5としてサンプリング定理を満たすサンプリング点数の半分からSAR画像を再構成したことを意味する。

3.2 Ku帯航空機SAR実験での原理検証

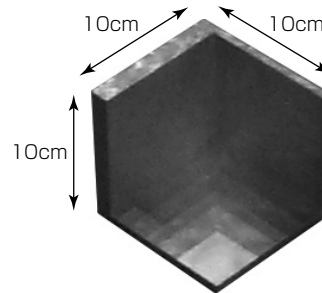
この節では、データを等間隔に間引いたSAR画像の偽像レベルを圧縮センシングによって改善する効果について述べる。図6は三菱電機が開発したKu帯航空機SARシステムである。航空機はダイヤモンドエアサービス社のGulfstream-IIを用いた。表2に実験の諸元、図7に等間隔にデータを間引いた場合のSAR画像、図8に等間隔にデータを間引いた場合のSAR画像へ圧縮センシングを適用した結果を示す。圧縮センシング適用によって、等間隔にデータを間引くことでサンプリング定理を満たさなくな

表1. 電波暗室SAR実験の諸元

中心周波数	33GHz
送信帯域幅	14GHz



(a) 電波暗室実験用レーダ



(b) 観測対象

図4. 電波暗室実験用レーダと観測対象

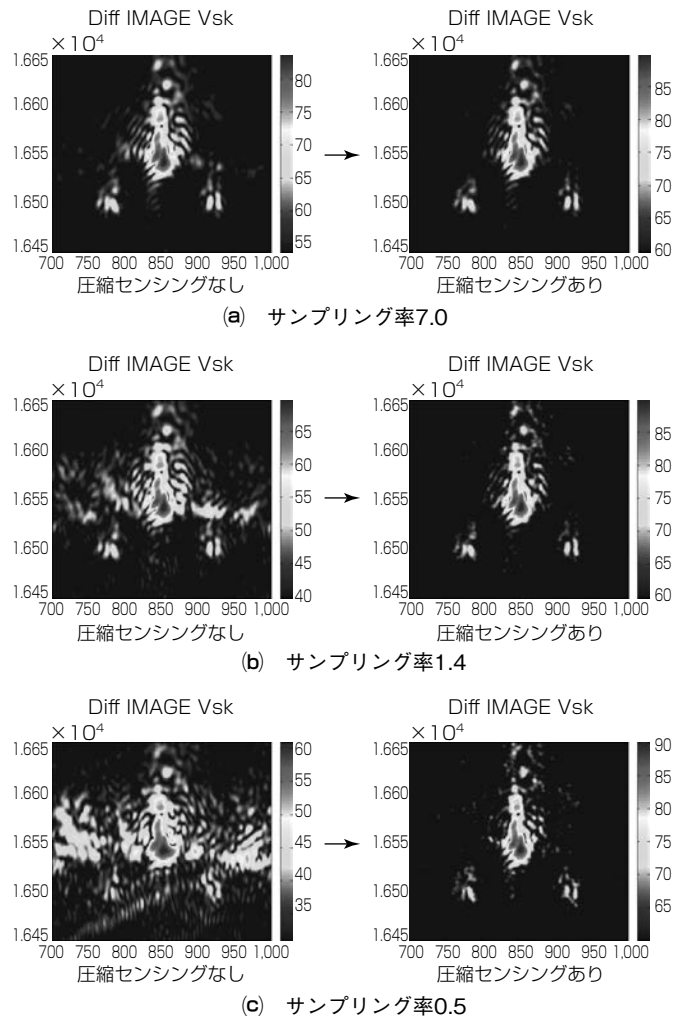
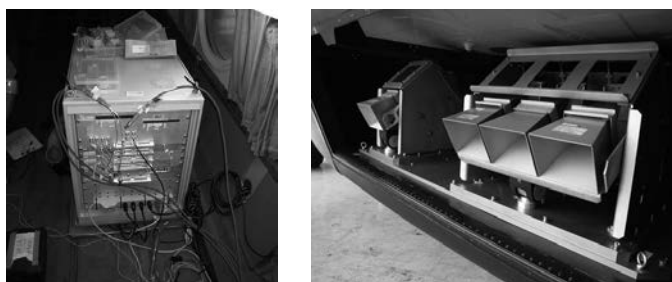


図5. ランダムサンプリング時の再構成結果



(a) 信号送受信機 (b) 送受信アンテナ

図6. Ku帯航空機SARシステム

表2. 航空機SAR実験の諸元

中心周波数	16.45GHz
SAR画像分解能	10cm×10cm
データ間引き前のサンプリング率	1.2
データ間引き後のサンプリング率	0.6



図7. サンプリング定理を満たさない(サンプリング率0.6)の航空機SAR画像



図8. 図7のデータに圧縮センシングを適用して再構成した画像



図9. サンプリング定理を満たす(サンプリング率1.2)の航空機SAR画像

り発生した偽像が抑圧された様子が見て取れる。図9にサンプリング定理を満たすSAR画像を示す。図8と図9を

表3. 偽像レベル評価

サンプリング率1.2のSAR画像	-58.7dB
サンプリング率0.6のSAR画像	-35.9dB
圧縮センシングSAR画像	-45.5dB

比較すると、圧縮センシングによって遜色なくデータが再構成されている様子が見て取れる。画像を構成する真点のうち強度値が最大の点と、同点の偽像領域内で強度値が最大の点の強度値比を偽像レベルとして定義し、表3にその評価結果を示す。表から圧縮センシング適用前後で偽像レベルが-35.9dBから-45.5dBまで9.6dB抑圧された様子を確認した。一方で、サンプリング定理を満たしたSAR画像の偽像レベルは-58.7dBであることから、圧縮センシングによる偽像レベル改善には13.2dBの改善余地があることも確認した。

4. むすび

合成開口レーダ向け圧縮センシングの基礎検討の結果、従来に比べてデータ量を半分にした場合でも、圧縮センシング技術によってデータが再構成できることを電波暗室及び航空機でのSAR実験から確認し、特に航空機SAR実験では偽像レベルが9.6dB改善されることを確認した。一方で、13.2dBの改善余地があることも確認した。この技術はSARセンサの小型・低コスト化等への活用が見込まれ、省資源な宇宙開発への貢献が期待できる。

参考文献

- (1) 陸域観測技術衛星2号, だいち2号(ALOS-2), 三菱電機技報, 89, No.1, 15 (2015)
- (2) Eldar, Y.C., et al.: Compressed Sensing, Cambridge University Press (2012)
- (3) Liu, D., et al.: Synthetic aperture imaging using a randomly steered spotlight, IEEE IGARSS, 919~922 (2013)
- (4) 星野尙寛, ほか: 圧縮センシングを用いたSAR画像再構成に関する原理検証, 電子情報通信学会総合大会, B-2-44 (2016)
- (5) Hoshino, T., et al.: An Experimental Study of Compressive Sensing for Synthetic Aperture Radar, IEICE SANE2016-77, 133~137 (2016)