

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04528

研究課題名(和文) デジタル送信制御による合成開口レーダの多重化技術の研究

研究課題名(英文) Study on multiplexing technology of synthetic aperture radars based on digital transmit control

研究代表者

植松 明久 (Uematsu, Akihisa)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：00450685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、衛星搭載合成開口レーダの観測幅拡大方策として、送信周波数の多重化及びビームフォーミングの手法について提案を実施し、実験により検証した。提案方式は、海外で提案されている別方式と比較すると、単位周波数あたりの瞬時電力密度は増大しないため、他の人工衛星局への干渉リスクの増大を抑制しつつ、観測幅の拡大が可能である点が強みとなる。提案方式について、ソフトウェア無線機を用いて実装し、検証実験を行った結果、2つの異なる周波数を有するレーダ信号のビーム指向制御が独立に可能であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、送信時のデジタルビームフォーミングの応用が、通信分野のみならずリモートセンシング分野へ広がることが期待される。また、従来の海外の先行研究では、送信多重化技術の適用は衛星や衛星に搭載するアンテナの大型化を前提としたものであったが、本研究における提案方式は、衛星サイズによらず適用可能であることから、複数本の送信ビームによる合成開口レーダの観測幅拡大について、小型衛星を含めた応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Transmission frequency multiplexing and beamforming method is proposed and verified for spaceborne synthetic aperture radar (SAR) to realize wider swath width. With the proposed method, compared to the similar method proposed in overseas, transmit power density per frequency does not increase, and increase of the swath width can be realized without increasing interference with other satellites. The proposed method is verified with the experiment using software defined radio and confirmed that beam control of radar signal with two different frequencies is possible independently.

研究分野：計測工学

キーワード：合成開口レーダ マイクロ波リモートセンシング デジタル送信制御 周波数多重化 デジタルビームフォーミング ソフトウェア無線

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR) は天候や昼夜を問わず地表面観測の画像を取得するセンサであり、災害対応や森林監視、農業などの分野で活用されている。

近年、素子毎に備えられているアンテナ移相器を D/A 変換器に置き換えることにより、送信ビームをデジタル領域で制御するデジタルビームフォーミング (DBF) が提案されてきた [1]。素子毎に個別に D/A 変換器を通して送信信号を生成することで、移相器を備えることなく素子毎の遅延制御が可能となるのみならず、1 式のアンテナ系で複数周波数の信号を同時送信でき、かつチャンネル毎の独立ビーム制御を行うことができるようになることが知られている。SAR 衛星に対しても、受信 DBF の適用 [2] に加え、送信時にも DBF を適用することで、観測幅の拡大が期待できる。一方、海外の先行研究 [3-4] において、送信方法を工夫することにより、送信領域を拡大する提案がなされていた。送信パルスを時間方向に複数回に分割し異なる方向へサブパルスと呼ばれるパルスを送信する SAR において、送信時間を分割して観測幅内の複数の領域へ切り替えながら送信する方式を用いることで、観測幅の拡大が可能である [3]。しかしながら、ある瞬間において送信している信号は 1 種類のみである。このため、例えば 2 つの異なる領域に送信する場合、2 つのサブパルスに時間分割して送信する。この場合、1 つの送信方向への送信時間は半分になるため感度の劣化を招く。感度の劣化を補うためにはピーク送信出力を 2 倍上げる必要があり、送信周波数チャンネルごとの単位周波数あたりの瞬時電力密度が 2 倍に増大することから、他の人工衛星局への干渉リスクが増大する [3]。一方、送信時に分割開口面を有するアンテナを用いて OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) により直交する複数の送信波を同時送信する合成開口レーダシステムが提案されており、送信波毎に観測幅内の領域を割り当てることで、観測幅の拡大が可能である [4]。しかしながら、レンジアンビギュイティが従来の SAR より増大することを補償するため、より大型の受信アンテナを用いることから、システム全体が大型化する欠点がある。

そこで、アンテナサイズを大きくする必要がなく、大型衛星のみならず小型衛星への適用も可能な観点から、送信周波数多重化 SAR において、送信・ビームフォーミング方法について研究を行うとともに、実験により検証を行うことを目指した。

2. 研究の目的

本研究では、アンテナ・衛星サイズの増大を招かないことを前提として、送信周波数多重化 SAR について、送信・ビームフォーミング手法の提案を行った。提案する手法として、送受兼用のアンテナを使用し、複数の開口面を束ねた一式のアンテナから、周波数分割された複数の異なるチャンネルのビームを同時送信する方式を示した。提案方式においては、[3]と同様に、ピーク送信出力は 2 倍に増大するものの、先行研究 [3]とは異なり、単位周波数あたりの瞬時電力密度は 1 倍ですむことから、他の人工衛星局への干渉リスクの増大を抑制することが可能である。また、先行研究 [4]とは異なり、アンテナを大型化する必要がないため、衛星への搭載性において優位性がある。

また、提案した手法を模擬するシミュレーション環境を構築するとともに、ソフトウェア無線機実験による室内実験環境を構築し、周波数毎の信号分離及びビーム指向能力の検証を行う実験を実施した。

3. 研究の方法

(1) 送信手法の提案

衛星搭載合成開口レーダの観測幅拡大方法の一方策として、複数の開口面を束ねたアンテナを用い、開口面ごとに複数の異なる周波数チャンネルの和信号を生成し、チャンネル毎に観測領域を割り当て、ビームフォーミングにより観測幅内の割り当てられた各領域へ、各周波数のチャープ信号を同時送信することにより、観測幅を拡大し、ひいては観測頻度を高めることを可能とする方式の提案を実施した [5-6]。海外で提案されている別方式と比較すると、単位周波数あたりの瞬時電力密度は増大しないため、他の人工衛星局への干渉リスクの増大を抑制しつつ、観測幅の拡大が可能である点が強みとなる。本提案方式について、特許出願を実施した。

提案方式の概要は以下の通りである [5-6]。図 1 (左) に送信周波数多重化 SAR による複数領域観測の概念図を示す。送受信共用の SAR アンテナから地面に向けて送信する際、レンジ方向において、送信周波数 f_1 及び f_2 を有する送信ビーム 1 及び 2 を割り当てる。これにより、従来の単一送信周波数 SAR と比べ、2 つの周波数を割り当てた場合は 2 倍の観測幅が確保可能である。このような送信を図 1 (右) に示すような機能ブロック図で実現することができる [5-6]。図 2 に送信周波数ごとのイメージ図を示す。送信周波数 f_1 及び f_2 における各送信チャープ信号の遅延時間のパターンを変えることで、ビーム送信角度を割り当てている。送信出力については、感度を単一送信周波数 SAR と同等とする場合、単一送信周波数 SAR の 2 倍とする必要があるが、単位周波数あたりの瞬時電力密度は変わらないため、[3]に示される方式に対し、他の人工衛星局への干渉の点で優位性がある。

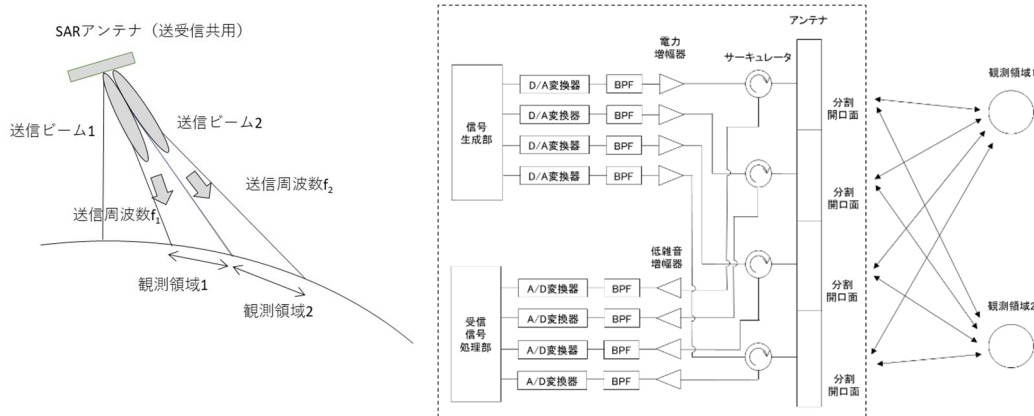


図 1 (左) 送信周波数多重化 SAR による複数領域観測の概念図[5]。(右) 送信周波数多重化 SAR の機能ブロック図[5-6]。

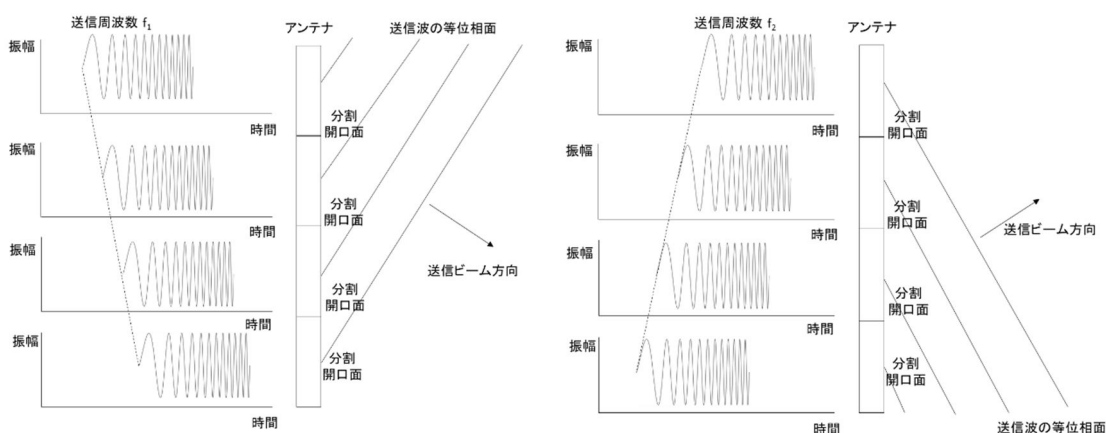


図 2 送信周波数多重化 SAR の送信イメージ図[5-6]。(左) 送信周波数 f_1 、(右) f_2 。

(2) レンジ圧縮シミュレーション環境の構築

レンジ圧縮部分について、圧縮・送受信・復元を行うシミュレーション環境を計算機上に構築した。具体的には、別々に生成した周波数の異なる複数のチャープ信号を同時に送信し、合成及び受信波のレンジ圧縮を行う処理をシミュレーションできるようにした。

(3) 2 波同時送受信・ビームフォーミング能力の検証

周波数多重送信合成開口レーダのレンジ圧縮・送受信・復元の一連の過程を確認するため、ソフトウェア無線機とアンテナを組み合わせた実験系を電波暗室内に整備した[5]。また、2つのチャンネルを同時に送信後、受信・復元処理を行うとともに、ビーム指向能力の検証を行うため、複数のアンテナ素子を用いて、独立したチャンネル毎にビーム方向を定めるためのビームフォーミング機能を、ソフトウェア無線機を用いて実装し、実験を行った[6]。

図 3(左)に実験の概要図を示す。電波暗室外にソフトウェア無線機と、LabVIEW(NI-USRP アドオンを含む)をインストールしたパソコンを接続し、電波暗室内に送受信アンテナを設置し、同軸ケーブル及び電波暗室壁面のコネクタを経由して接続した。送信アンテナは回転台の上に設置し、2素子を水平方向に並べたアレイアンテナとし、素子間隔は 20 cm とした。受信アンテナは送信側と対向させる形で設置し、送信側と同一のアンテナを 1 素子のみ設置した。

図 3(右)に送受信周波数とビームの関係を示すイメージ図(上から見たイメージ)を示す。Beam 1 と Beam 2 で異なる中心周波数のチャープ信号を送信できるようにし、かつボアサイトの方位角を変更できるように、LabVIEW 上に実装を行った。素子毎のタイミング違いについては、デジタルオシロスコープで波形タイミングを観察の上、移相器により調整した。実験における送受信周波数は L バンド SAR で使用されている 1.2 GHz 帯とし、Beam 1 及び Beam 2 においてそれぞれ 140 kHz 帯域幅(中心周波数を: 1250.08 MHz (Beam 1)、1250.24 MHz (Beam2))とした。実際には、それぞれの中心周波数を、80 kHz (Beam 1) 及び 240 kHz (Beam2) とし、ソフトウェア無線機 (USRP) 内部において 1.25 GHz のローカル信号とのミキシングによるアップコンバートを経て送信を行った。

一方、受信時においては、USRP 内部において受信信号と 1.25 GHz のローカル信号とのミキシングによるダウンコンバートを行った後、受信データを CSV 形式で保存した上で、以後のフ

フィルタリング及びレンジ圧縮処理を全てワークステーション上の MATLAB において実施した。フィルタリングについては、バンドパスフィルタ (BPF) によって、Beam 1 及び Beam 2 に対応してそれぞれ 5 ~ 155 kHz 及び 165 ~ 315 kHz の通過帯域でフィルタリングを実施後、それぞれのビームの信号について、中心周波数を 0 Hz となるよう周波数シフトを実施し、ローパスフィルタ (LPF) によって 75 kHz を通過帯域周波数としてフィルタリングを実施した。また、レンジ圧縮については送信信号の複素共役を参照関数とし、合成開口レーダで一般的な周波数領域でのパルス圧縮処理[7]を実施した。

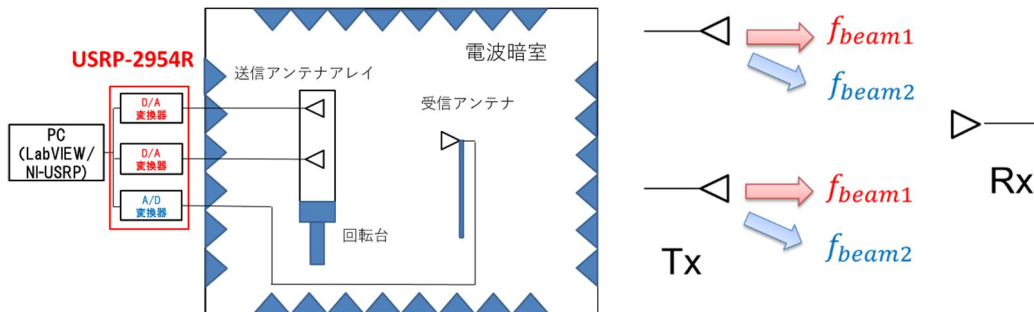


図 3 (左)ソフトウェア無線機を用いた信号分離・ビーム指向実験の概要[6]。図では垂直で示しているが、実際のアンテナアレイは水平方向に 2 素子である。(右)送受信周波数とビームの関係を示すイメージ図 (上から見たイメージ) [6]。

4. 研究成果

実験は、Beam 1 のボアサイトの方位角を 0° (送信アンテナ架台から受信アンテナに向けた方位を基準とする) となるよう初期位相を設定し、Beam 2 の方位角を 0° と 37° の 2 つのケースで設定して実験を進めた[6]。アンテナ回転台の物理的な方位角については固定した。2 素子のアレイアンテナのボアサイト方位角を変更するようタイミングを設定した場合の方位角に対するピークに対する電力比の関係を図 4 に示す。方位角を 37° となるようにタイミングを設定した場合、方位角が 0° における電力は小さく、ヌル点となっている。

次に、LabVIEW 上の受信信号スペクトル表示を図 5 に示す。Beam 1、Beam 2 を共に 0° とした場合、各周波数のスペクトルが同じレベルで表れている一方、Beam 2 のみを 37° とした場合、Beam 2 側の信号レベルが低下していることが分かる。

また、レンジ圧縮処理後のレンジと相対電力 (方位角 0° のピーク値に対する値、リニアスケール) の関係を図 6 に示す。レンジ圧縮処理がなされ、SAR における点像の応答に相当するデータが得られているとともに、Beam 1 を 0° 、Beam 2 を 37° とした場合 (図 6 右) Beam 2 側の周波数におけるデータのレベルの低下を捉えることができた。このことから、周波数毎の信号分離が出来ているとともに、ビームフォーミングの効果を反映したデータを得られていることが分かった。

このことから、2 つの異なる周波数を有するレーダ信号のビーム指向制御が独立に可能であることが確認できた。本成果により、複数本の送信ビームによる合成開口レーダの観測幅拡大への提案手法の応用が期待される。

<引用文献>

- [1] 電子情報通信学会 『知識の森』 アレイアンテナ (http://www.ieice-hbkb.org/files/04/04gun_02hen_07.pdf)
- [2] Y. Okada, Y. Yokota, A. Karasawa, M. Matsuki, M. Arii and S. Nakamura, "Hardware Performance of PALSAR-3 Onboard ALOS-4," 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018, pp. 4175-4176, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519209.
- [3] G. Krieger, N. Gebert and A. Moreira, "Multidimensional Waveform Encoding: A New Digital Beamforming Technique for Synthetic Aperture Radar Remote Sensing," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, no. 1, pp. 31-46, Jan. 2008, doi: 10.1109/TGRS.2007.905974.
- [4] J. -H. Kim, M. Younis, A. Moreira and W. Wiesbeck, "Spaceborne MIMO Synthetic Aperture Radar for Multimodal Operation," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 5, pp. 2453-2466, May 2015, doi: 10.1109/TGRS.2014.2360148.
- [5] 植松明久, 西堀俊幸, "送信周波数多重化合成開口レーダによる観測幅拡大," 信学技報, Vol. 121, No. 378, pp.26-30, 2022.
- [6] 植松明久, 西堀俊幸, 川口剛幸, "送信周波数多重化合成開口レーダに向けたソフトウェア無線機による多周波マルチビーム指向実験," 信学技報, Vol. 122, No. 408, pp.113-117, 2023.
- [7] 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎[第 2 版], 東京電機大学出版局, 東京, 2009.

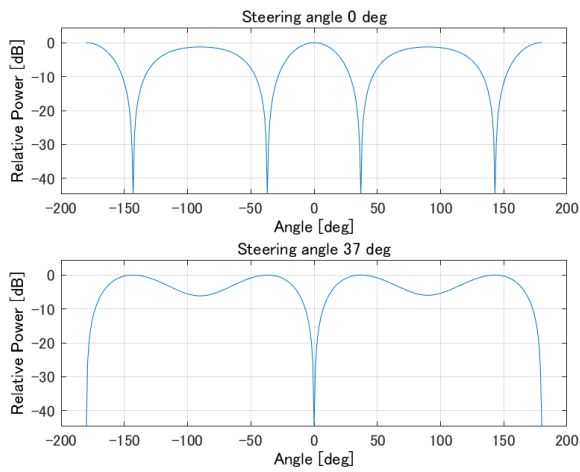


図4 2素子のアレイアンテナのボアサイトの方位角を(上)0°、(下)37°と設定した場合のピークに対する電力比の関係[6]。周波数を1.25 GHz、素子間距離を20 cmとした。

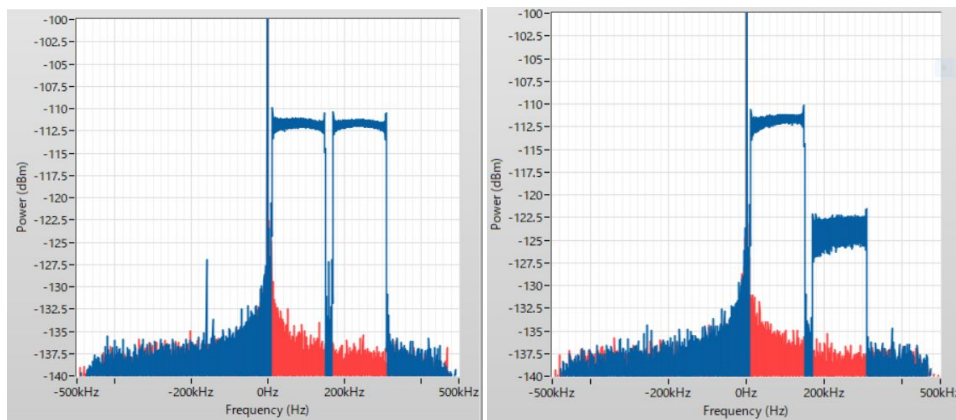


図5 LabVIEW上の受信スペクトル表示(青線)[6]。方位角について、(左)Beam 1、Beam 2を共に0°とした場合、及び(右)Beam 1を0°、Beam 2を37°とした場合。

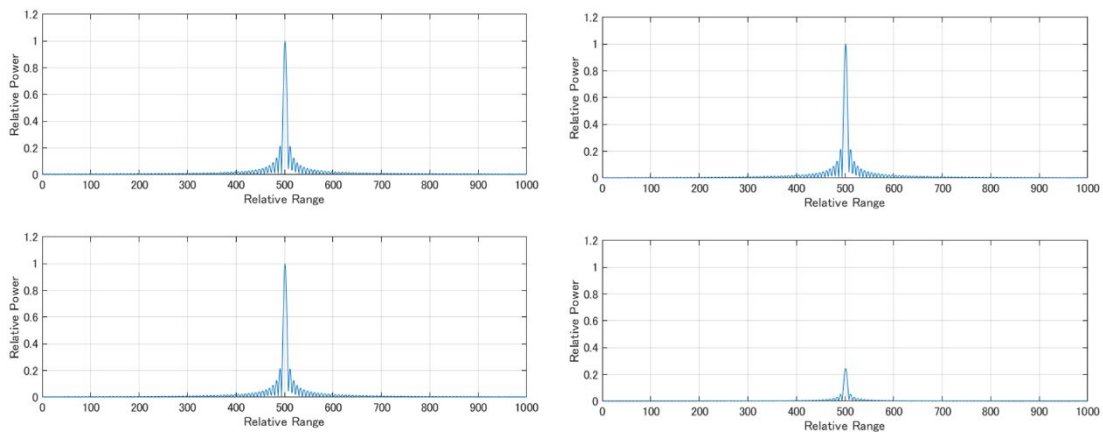


図6 レンジ圧縮処理後のレンジと相対電力(方位角0°のピーク値に対する値、リニアスケール)の関係[6]。(左)方位角をBeam 1、Beam 2を共に0°とした場合。(右)方位角をBeam 1を0°、Beam 2を37°とした場合。(上)Beam 1の周波数、(下)Beam 2の周波数を対象に処理。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 植松 明久, 西堀 俊幸
2. 発表標題 送信周波数多重化合成開口レーダによる観測幅拡大
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植松 明久, 西堀 俊幸, 川口 則幸
2. 発表標題 送信周波数多重化合成開口レーダに向けたソフトウェア無線機による多周波マルチビーム指向実験
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 合成開口レーダ装置、および合成開口レーダ装置における電波の送信方法	発明者 植松 明久	権利者 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特開2023-048655	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	西堀 俊幸 (Nishibori Toshiyuki) (80280361)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹 (82645)	
研究分担者	川口 則幸 (Kawaguchi Noriyuki) (90214618)	国立天文台・水沢V L B I 観測所・名誉教授 (62616)	

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
---------	---------