

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月

TELEDYNE e2v | Semiconductors
Everywhere you look

コンテキスト

マイクロ波システムに関する第 7 回ワークショップと第 5 回 Ka バンドワークショップ(2022 年 5 月 10~12 日)。ステファノ・リスチ (1)、リカルド・マッシーニ (1)、ロメイン・ピラード (2)、ダニエレ・スタグリアーノ (1)、ニコラス・シャンティエ (2)

(1) ECHOES s.r.l. - Via M. Giuntini 63, 56023 Cascina - Italy

E メール : stefano.lischi@echoes-tech.it、daniele.stagliano@echoes-tech.it、riccardo.massini@echoes-tech.it

(2) Teledyne e2v - Avenue de Rochepleine, 38126 Saint Egrève - France.

E メール : nicolas.chantier@teledyne.com

まえがき

合成開口レーダー (SAR) は、リモートセンシングに用いられる能動型画像センサーで、あらゆる気象条件下で広域の画像を取得できます。SAR 撮像では、動くプラットフォーム上に設置されたアンテナを使用して受信したエコーを処理することで、より大きな合成アンテナ開口部を確保して、方位分解能を向上させることができます。

ある特定の周波数帯のレーダーは通常、他の周波数帯のレーダーとは能力、特性、用途が異なります。例えば、マイクロ波の浸透能力は基本的に周波数に依存することがよく知られています[1]。一般に、浸透震度はマイクロ波の周波数に反比例します。周波数が高いほど、浸透深度は小さくなります。また、地形特性は浸透能力に影響を及ぼし、湿度はマイクロ波の浸透を遮断するものとして作用します[2]。P バンドレーダーシステムと L バンドレーダーシステムの軍事、民生分野での新たな用途として、葉やカモフラージュで隠された標的の検知、埋設物の検出、林業分野での用途、バイオマス測定、考古学的探査、地質学的探査などが挙げられます。

一方より高い周波数、たとえば X バンド、Ku バンド、Ka バンドでは、(レンジ精度やレンジ分解能を決定する) 帯域幅がより広く、(角度精度や角度分解能を決定する) 狭ビームアンテナがより小さくできるため、レンジや位置の正確な測定が容易になります[3]。これらのことから、1 つのマルチバンド SAR システムが、さまざまな用途やエンドユーザーに対して、運用の柔軟性や観測能力の面でメリットをもたらす可能性があることは明らかです。

本論文の目的は、Ka バンドまでのダイレクト・サンプリングが可能な Teledyne e2v の新型 DAC (デジタルアナログ・コンバーター) と ADC (アナログ・デジタル・コンバーター) を利用したマルチバンド SAR の実現性を検討した結果を紹介することです。特にデュアルチャンネル DAC は、広い瞬時帯域幅 (12 GSps で最大 6 GHz) と広い出力アナログ帯域幅 (最大 25 GHz) を有しているので、マイクロ波信号を直接を生成できます。この実現性の検討作業は、主要な主要技術の分析、アーキテクチャの定義や航空プラットフォームに搭載可能なマルチバンド SAR システムの設計に必要なものです。コンポーネントの一例と、期待される雑音等価後方散乱係数 (NESZ)、受信電力、データレート等の性能について考察します。

主な実現技術 : DAC と ADC

超高速サンプリング DAC と超広帯域アナログ ADC は、提案対象のフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの重要な要素技術です。

特に、12 GSps でサンプリングするデュアルチャンネル EV12DD700 DAC[4]は、6 GHz の瞬時帯域幅を持ち最大 25 GHz の-3dB アナログ帯域幅まで、複数のナイキストゾーン (NZ) で同時に動作させることが可能です。2RF を含む複数の出力モードにより、図 1 に示すとおり、アップコンバージョンなしで 21 GHz を超える信号を直接出力することが可能です。EV12DD700 DAC のその他の特徴としては、俊敏性の高い周波数ホッピングに対応する高速プログラマブル複合ミキサー、プログラマブル Anti-sinc フィルター、デジタル・アップコンバージョン等の様々なデジタル・ファンクションとマルチデバイス同期が挙げられます。

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月



TELEDYNE e2v | Semiconductors
Everywhere you look

EV12PS640 Proof-of-Concept ADC [5]は、デジタルビーム形成のための大規模な同期処理機能を備えた 1 チャンネルデバイスです。図 2 に示すとおり、シングルエンド ADC 入力で 30 GHz までの高周波 (RF) のダイレクト・サンプリングに対応しています。シングルエンド入力のため、RF バランやそれに伴う信号の歪み、帯域幅の制限を受けずに受信信号経路を設計できます。最大 12.8 GSps のサンプリング周波数により、最大 6.4 GHz の NZ 幅が確保されます。

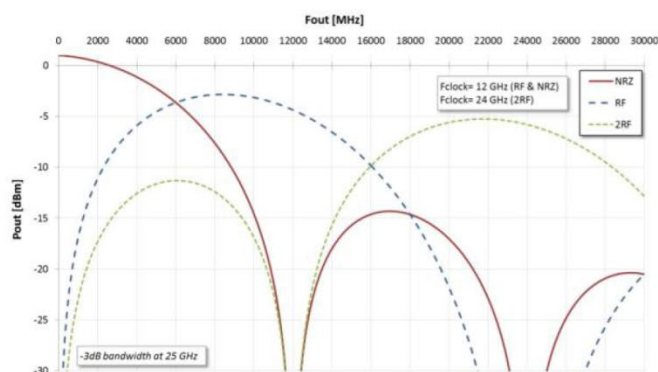


図 1 動作モード別の DAC の出力電力と出力周波数の関係

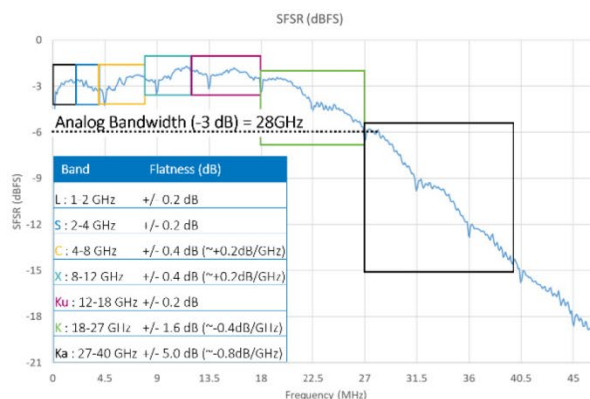
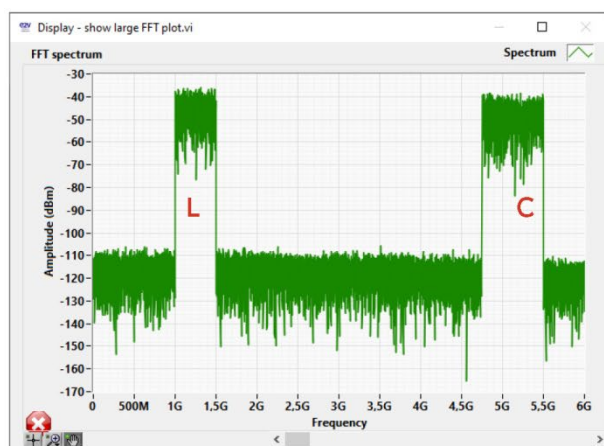


図 2 シングルエンド信号での入力帯域幅の特性

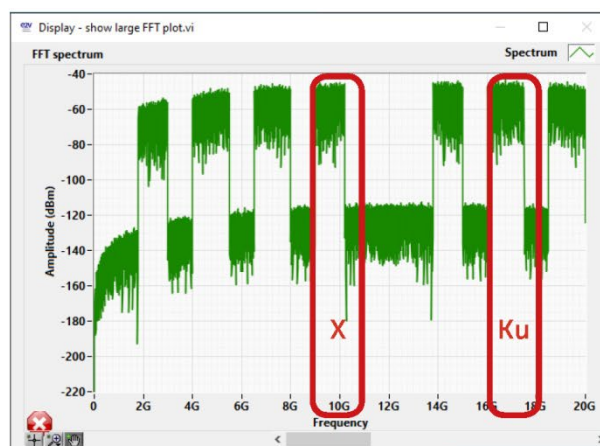
アーキテクチャー

本論文では、フル・デジタル・4 バンド SAR を提案します。最大 12 GSps の高速サンプリングにより、1~1.5 GHz の任意の L バンド波形と 4.75~5.5 GHz の C バンド信号を非ゼロ復帰 (NRZ) モードで重複なく直接合成できます。

また、DAC は RF モードで複数の NZ で動作できるため、2 番目の NZ で X バンドの波形を、3 番目の NZ で Ku バンドのパターンを同時に生成することが可能です。具体的には、X バンドでは 9~10.2 GHz、Ku バンドでは 16~17.5 GHz の波形を生成できます。図 3 は、DAC 出力における雑音様の波形のスペクトルを示したものです。



a) 第 1NZ の NRZ モードにおける L バンドと C バンド



b) 第 2NZ と第 3NZ の RF モードにおける X バンドと Ku バンド

図 3 DAC 出力の雑音様スペクトル

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月



DAC の NRZ 出力は、エイリアシングを避けるため、5.5 GHz でローパスフィルタがかけられます。その後、増幅されて広帯域アンテナに送信されます。RF 出力は、図 3b に示すとおり、第 2NZ で X バンドを、第 3NZ で Ku バンドを選択するバイバンドフィルタでフィルタリングされます。

図 4 に示す提案対象のマルチバンド SAR のアーキテクチャは、パルスレーダー方式を採用しています。そのため、受信チェーンの接続には、2 本のアンテナそれぞれにサーキュレーターを使用します。DAC 出力と同様に、受信信号は L+C チャンネルではローパスフィルタ、X+Ku チャンネルではバイバンドフィルタでフィルタリングされた後で、12 GHz の同一サンプリングクロックで動作する 2 つの ADC を使用して増幅、デジタル化されます。

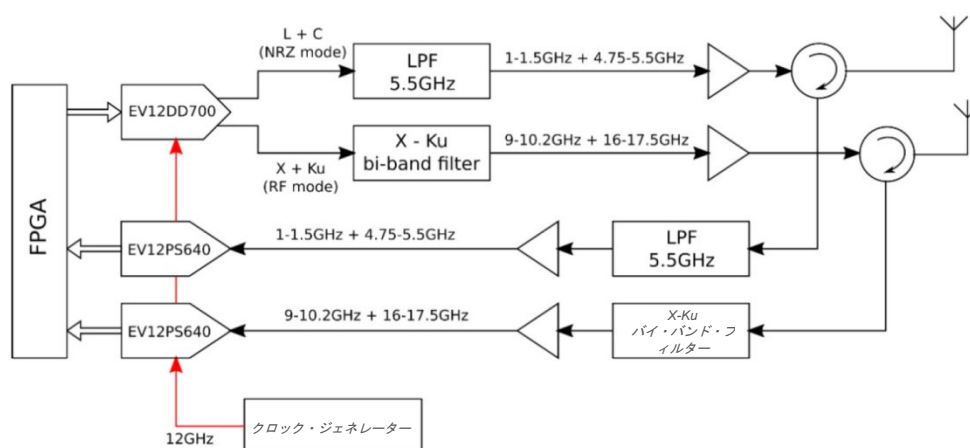
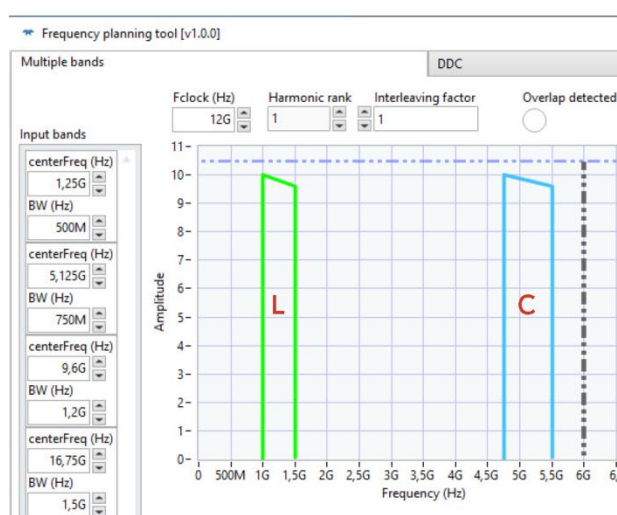
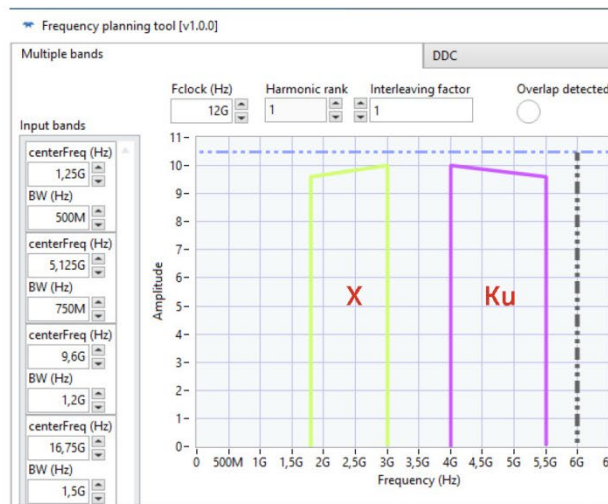


図 4 マルチバンド SAR アーキテクチャ

図 5 は、2 つの ADC の周波数プランを示したものです。L バンドと C バンドはともに 6 GHz に相当する第 1NZ に入るため、エイリアシングなしに直接サンプリングされます。一方、X バンドと Ku バンドは第 2NZ と第 3NZ にあるため、第 1NZ ではそれぞれ 1.8~3 GHz、4~5.5 GHz の範囲で重なることなく折り返しています。FPGA は所定のレーダー信号を合成するための任意波形発生器を実装し、ADC から高速 SSD（ソリッドステートディスク）に書き込まれる、高速デジタル信号を処理します。



a) L+C バンド。



b) X+Ku バンド。

図 5 第 1 ナイキストゾーンにおける ADC の周波数プラン

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月



TELEDYNE e2v | Semiconductors
Everywhere you look

フロントエンドのアーキテクチャーにおいては、入力と出力のフィルターが特に重要となります。出力フィルターは、所定の帯域を選択し、不要なエイリアス帯域を抑制するために必要です。一方、他の帯域外の信号による干渉を防ぎ、全体のノイズレベルを下げるためには、ノイズと不要な信号を除去する入力フィルターが必要です。これらのフィルターはマルチバンド・フィルター技術を使用して、マイクロストリップ技術で設計できます。また、広帯域信号を2つの帯域に分割し、単一バンドフィルターでフィルタリングした後、再結合する方法も考えられます。

DAC の出力レベルをパワーアンプの入力に必要な電力レベルに合わせるために、中間ドライバー段が必要になります。パワーアンプは、各周波数帯の送信電力要件を満たす十分な電力を扱える必要があります。システムはパルス方式のため、送信電力の平均レベルを考慮する必要があります。これにより、アンプを選択しやすくなります。送信機と受信機で同じアンテナを共有するには、パワーアンプの出力に広帯域サーキュレーターを取り付ける必要があります。

受信側では、送信電力に応じて低雑音増幅器（LNA）をパワーリミッター装置で保護する必要があります。この保護を行わなければ、サーキュレーターの絶縁能力の問題（通常 20dB）のため、LNA が送信段階で損傷する可能性があります。

航空機搭載システム実証機の開発

4 つの動作周波数帯全てに対して 1 つのアンテナを使用することで、SAR 画像の位置合わせが可能になります。ただし、1 GHz から 18 GHz までの超広帯域の周波数帯は、利得とアンテナサイズの折り合いをつけた単一のアンテナに収容することが困難です。また、L バンドと C バンドは同じ DAC と ADC で合成、デジタル化され、X バンドと Ku バンドも同様であるため、図 4 に示すとおり、2 つの別々のアナログチェーンを実装すると便利です。

L バンドと C バンドは、Ainfo LB-560 [6]などの広帯域ホーンアンテナを使用して送受信でき、図 6 に示すとおり 0.5~6 GHz の周波数範囲で 10~12 dBi のほぼ一定の利得を確保できます。一方、Ainfo LB-60180-20 [7]のような帯域幅 6~18 GHz のマルチオクターブホーン・アンテナは、図 7 でプロットしているとおり、X バンドで約 20 dB、Ku バンドで約 22 dBi の利得で X バンドと Ku バンドの両方を扱うことができます。

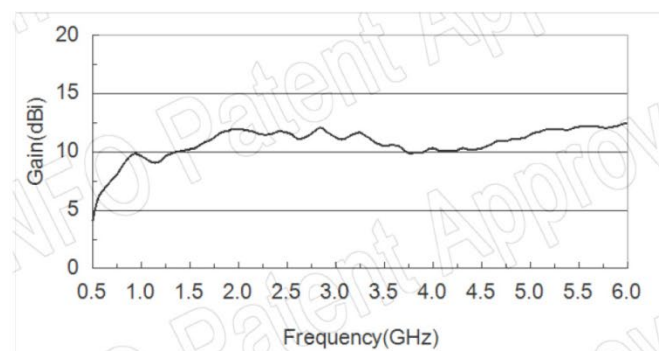


図 6 LB-560 広帯域アンテナ利得

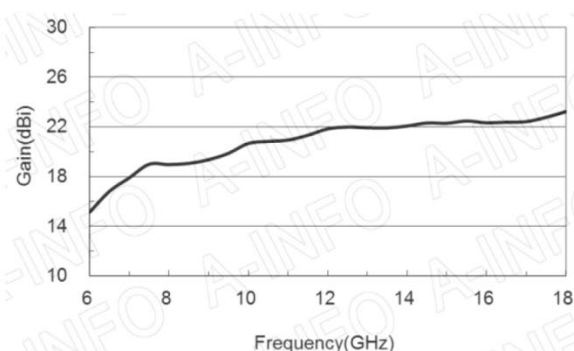


図 7 LB-60180-20 マルチオクターブ・アンテナ利得

L バンドと C バンドの場合、電力増幅は例えば 0.7~6 GHz の周波数範囲で 48 dBm の標準出力を有する RF-Lambda のパワーアンプ RFLUPA0706GG [8]で行うことができます。たとえば、X バンドと Ku バンドでは、RF-Lambda の RFLUPA0618GE [9]というモデルが考えられます。このアンプは、6~18 GHz の周波数範囲において、50 dBm の出力を有しています。

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月



TELEDYNE e2V | Semiconductors
Everywhere you look

パワーアンプの出力には、通過帯域の高調波抑制フィルターが必要な場合があります。この場合、送信電力によっては、マイクロストリップの電力操作を慎重に評価する必要があります。X+Ku バンドの高出力広帯域サーキュレーターとしては、DORADO International の 4CCM14-1 [10] 同軸モデルが考えられます。これは、9~18 GHz に対応し、150 W の出力が可能です。L+C バンドの場合、これほど比帯域が大きなサーキュレーターを見つけるのは困難と思われます。代替案として、RF-Lambda のモデル RFSP2TR5M06GS などの大出力同軸スイッチも使用できます[11]。

このような高周波デジタル・システムでは、低ジッタークロック信号が重要となります。クロックジェネレーターは、位相ロックループを利用した信号合成器を使用して実装できます。この点において、電圧制御発振器を内蔵した Analog Devices のマイクロ波シンセサイザー ADF4152 は、優れたノイズ特性を備えています[12]。クロック分配器は、高周波狭帯域スプリッターで実現できます。

Hitech Global の HTG-960 Virtex UltraScale+ VU19P 開発プラットフォーム [13] は、FPGA Mezzanine Card (FMC) 規格に従って DAC および ADC と接続できる優れた FPGA ボードの候補です。また、FMC インターフェースには、取得したデータを記録するための NVMe (Non-Volatile Memory Express) 高速 SSD を、場合によっては Raid0 構成で接続することもできます。

提案対象システムの機能は、主翼下の専用ポッドに実験装置を搭載できる Tecnam P92JS SmartBay [14] のような超軽量機で実証できます。

期待されるレーダー性能

これまでに提案されたシステム構成要素を想定し、表 1 にまとめたパラメーターを用いて期待される SAR 性能を計算しました。損失と雑音指数についてはコンサーバティブな値を考慮しました。また、空中プラットフォームは、地上速度 40m/s で、地上平均 2,000 m を飛行すると想定しました。

パラメーター	記号	単位	L	C	X	Ku
中心周波数	f_0	GHz	1.25	5.125	9.6	16.75
送信電力ピーク	P_t	dBm	45	45	47	47
信号の帯域幅	B_s	MHz	500	750	1200	1500
繰り返し周波数	PRF	Hz	2000	8000	10000	12000
デューティサイクル	η	%	10	10	10	10
パルス持続時間	T_i	μs	50	12.5	10	8.33
雑音指数	F_N	dB	8	8	8	8
受信機帯域幅	B_r	MHz	600	900	1440	1800
無線周波数損失	LRF	dB	6	6	6	6
Signal processing loss	L _{DSP}	dB	6	6	6	6
アンテナ利得	G_a	dBi	10	12	20	22
アンテナ仰角 -3dB ビーム幅	θ_{el}	deg	47.69	39.40	14.46	9.03
アンテナ方位角 -3dB ビーム幅	θ_{az}	deg	43.83	47.84	16.18	9.87
アンテナ俯角	Ψ	deg	-35	-35	-45	-45
スラントレンジ分解能 (公称値)	dr	cm	30	20	12.5	10
最小スラントレンジ (-3db アンテナで)	r_{min}	m	2337	2451	2530	2630
最大スラントレンジ (-3db アンテナで)	r_{max}	m	10369	7591	3266	3081
Swath (-3dB アンテナで)	Δr	m	8032	5141	736	451
合成開口長	L _{SAR}	m	2806	3094	804	488
積算時間	CPI	s	84.19	92.82	24.12	14.66

表 1 シミュレーションのパラメーター

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月



提案したパラメーターを用いると、[15]から導かれる(1)に従い、各帯域における NESZ を計算できます。

$$NESZ(r) = \frac{(4\pi)^3 r^4 L_{RF} L_{DSP} k_B T_N F_N B_r}{P_t G_a^2 \left(\frac{c}{f_0}\right)^2 \eta T_i B_s PRF 2r_0 \tan\left(\frac{\theta_{az}}{2}\right)} \quad (1)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 T_N は基準温度 290° K、 r_0 は Swath の中心におけるスラントレンジです。図 8 は、0 dBm²/m² の分布反射率を仮定し、各種サブバンドにおけるグランドパッチからの受信電力を、スラントレンジの関数として描いたものです。また、アンテナの-3dB フットプリント全体からの積算電力も表示されています。L バンドと C バンドは、仰角 39 度を超える電力半値幅を持つ LB-560 アンテナを共有しているため、この周波数での Swath は L バンドで 2,337~10,369 m と非常に大きくなっています。LB-560 アンテナは L バンドと C バンドで利得がほぼ同じにもかかわらず、自由空間伝搬損失が異なるため、C バンドでの受信電力は L バンドより 20dB 低くなります。一方、X バンドと Ku バンドは、より指向性の強い LB-60180-20 を共有しています。そのため、上位 2 帯域の Swath がより狭くなっています。

図 9 は、各種サブバンドにおいて、スラントレンジの関数として予想される NESZ を示したものです。予想される NESZ は Ku バンドで -23 dBm²/m²、X バンドで -25 dBm²/m² より良好です。低周波アンテナのフットプリントでは、L バンドで 10 km 以上までの SAR 画像生成が可能です。ただし、NESZ が -20 dBm²/m² より良好であることは、SAR 画像が十分に良質であることを意味します。L バンドと C バンドの最大撮像範囲は、それぞれ 5,819 m と 4,092 m に制限されます。

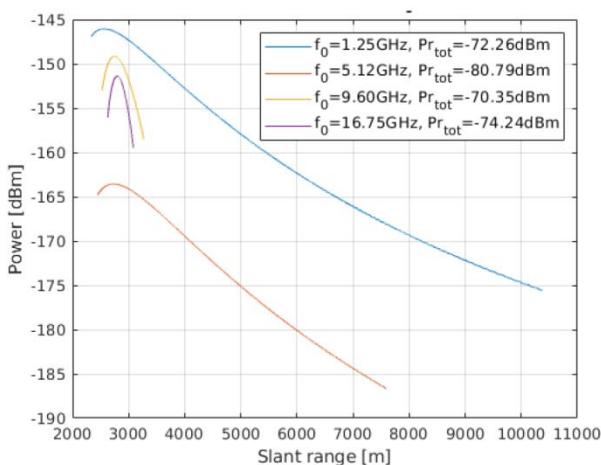


図 8 $\sigma_0 = 0\text{dBm}^2/\text{m}^2$ とした場合の受信電力

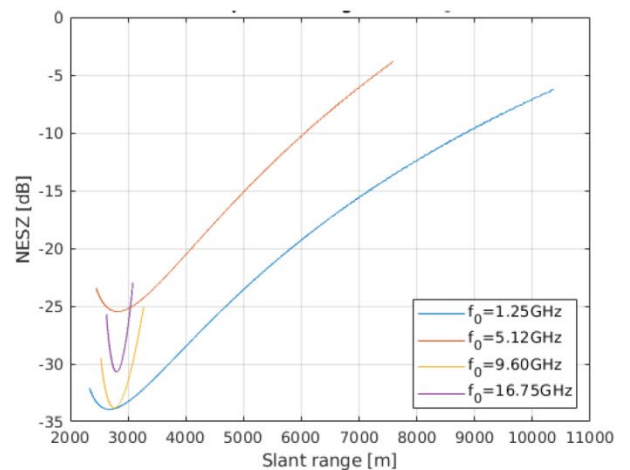


図 9 NESZ

オンボード処理と予想されるデータレート

記録するデータのデータレートを下げるために、図 10 に示した方式に従って、4 バンドの受信信号をボード上でサンプリング、前処理します。具体的には、サンプリングされた各帯域は、第 1NZ のそれぞれの中心周波数に応じてベースバンドにデジタル・ダウンスampling変換処理 (DDC) されます。次に、瞬時帯域幅に対応するため、線形補間 (CIC) フィルターによりサンプルレートを大幅に下げます。CIC フィルターの応答を補正するために、有限インパルス応答 (FIR) フィルターが使用されます。フィルタリングされた信号は、相互相関器 (Xcorr) によってレンジ圧縮され、距離オーバーサンプリング係数 4 で各バンドの対象距離ビンに制限されます。6,160 MB/s の合計データレートは、最終的に 2 チャンネルの Raid0 Gen.4 NVMe IP [16]に送られ、ここでレンジ圧縮されたデータがそれぞれ約 3,080 MB/s で 2 台の Gen.4 NVMe SSD に書き込まれます[17]。

L、C、X、Ku バンドに対応するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討

2022 年 8 月

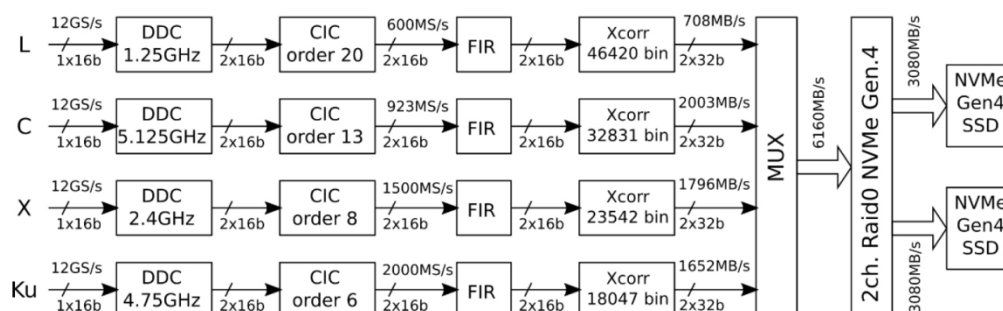


図 10 オンボード処理アーキテクチャー

結語と展望

本論文では、L、C、X、Ku バンドで動作するフル・デジタル・マルチバンド SAR システムの実現性の検討結果を紹介しました。まず、Teledyne e2v の革新的な DAC と ADC からなる主要な要素技術について説明しました。次に、提案対象のパルス式 SAR システムのアーキテクチャーについての解説。最後に、空中プラットフォームからマルチバンド SAR 画像生成が可能な航空機搭載システム実証機の実現可能性を評価するために、商用コンポーネントと商用技術の例について説明しました。NESZ、受信電力、データレートの観点から予測される性能を導き出し、分析しました。

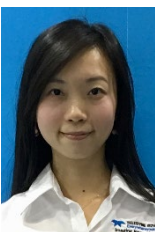
今後の展望としては、インパルス応答、位相直線性、スプリアスレベルの観点からもシステム性能を詳細に分析し、提案対象の航空機搭載マルチバンド SAR 実証機を開発することなどが挙げられます。このような実証機は新しいアーキテクチャを実現し、公的機関や民間企業の新しい宇宙開発競争によって推進される宇宙船搭載ペイロードの開発を促進し、より幅広い技術ロードマップの新たな一歩となるでしょう。

参考文献

- [1] Flores, Africa & Herndon, K. & Thapa, Rajesh & Cherrington, Emil.; "The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation", 2019.
- [2] Davis, Mark Edward; "Foliage penetration radar"; SciTech Pub., 2011.
- [3] Skolnik, M. I. «Radar Handbook 3Rd Edition/Merill I. Skolnik», 2008.
- [4] www.semiconductors.teledyneimaging.com/en/products/digital-to-analog-converters/ev12dd700/ (co-funded by Interstellar EU project, from Horizon 2020 Space programme under grant agreement N° 730165)
- [5] www.semiconductors.teledyneimaging.com/en/newsroom/how-to-sample-x-through-ka-band-rf-to-support-sdr-systems/
- [6] www.ainfoinc.com.cn/en/pro_pdf/new_products/antenna/Broadband%20Horn%20Antenna/tr_LB-560.pdf
- [7] www.ainfoinc.com.cn/en/pro_pdf/new_products/antenna/Broadband%20Horn%20Antenna/tr_LB-60180-20.pdf
- [8] www.rflambda.com/pdf/poweramplifier/RFLUPA0706GG.pdf
- [9] www.rflambda.com/pdf/poweramplifier/RFLUPA0618GE.pdf
- [10] www.dorado-intl.com/wp-content/uploads/2017/05/4CCM14-1.pdf
- [11] www.rflambda.com/pdf/switchers/RFSP2TR5M06GS.pdf
- [12] www.analog.com/en/products/adf4372.html#product-overview
- [13] www.hitechglobal.com/Boards/VirtexUltraScale+_VU19P_Board.htm
- [14] www.tecnam.ro/avioane/p92-js-smartbay.html
- [15] Doerry, Armin. "Performance Limits for Synthetic Aperture Radar - second edition", 2006.
- [16] www.dgway.com/products/IP/NVMe-IP/dg_nvme4ip RAID0x2_refdesign_xilinx_en.pdf
- [17] www.samsung.com/it/memory-storage/nvme-ssd/980-pro-2tb-nvme-pcie-gen-4-mz-v8p2t0bw/



詳細は、私にお問い合わせください
Yuki Chan,
マーケティング & コミュニケーション
マネージャー
Yuki.chan@teledyne.com



詳細は、私にお問い合わせください
Marc Stackler,
セールス兼
アプリケーションエンジニア
Marc.stackler@teledyne.com

