



背景

第七届射频和微波系统、仪器及相关子系统研讨会+第五届 Ka 波段研讨会(2022 年 5 月 10-12 日)
Stefano Lischi⁽¹⁾, Riccardo Massini⁽¹⁾, Romain Pilard⁽²⁾, Daniele Stagliano⁽¹⁾, Nicolas Chantier⁽²⁾

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

Email: stefano.lischi@echoes-tech.it, daniele.stagliano@echoes-tech.it, riccardo.massini@echoes-tech.it

⁽²⁾Teledyne e2v - Avenue de Rochepleine, 38126 Saint Egrève – 法国

Email: nicolas.chantier@teledyne.com

简介

合成孔径雷达(SAR)是一种用于遥感的主动成像传感设备,可以在各种天气条件下获得广域图像。SAR 成像使用安装在移动平台上的天线,通过对接收回波的处理,可获得更大的合成天线孔径,从而提高方位分辨率。

某一特定频段的雷达通常具有不同于其他频段雷达的性能、特点和应用场合。例如,众所周知,穿透能力基本取决于微波频率[1]。通常,穿透距离与微波频率成反比。频率越高,穿透深度越低。此外,地形特征会影响穿透能力,湿度对微波穿透起屏蔽的作用[2]。P 波段和 L 波段雷达系统的新兴军事和民用应用包括探测被树叶和/或伪装隐藏的目标、探测掩埋的物体、林业应用、生物量测量、考古和地质勘探。

在另一方面,在更高的雷达频率,例如 X、Ku 和 Ka 波段,更容易实现精确的距离和位置测量,因为它们具有更宽的带宽(其决定了距离精度和距离分辨率)和对于特定尺寸的物理天线的更窄的波束天线(其决定了角度精度和角度分辨率)[3]。考虑到以上几点,单一的多波段 SAR 系统在操作灵活性和不同应用以及最终用户的观测能力方面的优点是显而易见的。

本文将介绍基于 Teledyne e2v 专利的数模转换器(DAC)和模数转换器(ADC)的多波段 SAR 的可行性研究。这些转换器支持高达 Ka 波段的直接信号生成和直接合成。特别是,直接信号生成可通过双通道 ADC 实现,其拥有很宽的瞬时带宽(12Gsps 时高达 6GHz)和很大的输出模拟带宽(高达 25GHz)。这个可行性研究包括核心技术的分析、初步架构的定义和能够真正安装在机载平台上的多波段 SAR 系统的初步设计。我们将从噪声等效西格玛零(NESZ)、接收功率和数据率的角度,讨论器件的案例和预计的性能。

核心技术: DAC 和 ADC

具有超宽模拟带宽的高采样率 DAC 和 ADC 是实现全数字多波段 SAR 系统的关键技术。

特别是,双通道 DAC EV12DD700 支持 12Gsps 采样率,瞬时带宽高达 6GHz,可同时在多个奈奎斯特域(NZ)中工作,-3dB 模拟带宽最高可达 25GHz。包括 2RF 的多种输出模式允许在 21GHz 及更高的频率进行无需上变频的直接信号合成,如图 1 所示。EV12DD700 的其他特点包括:快速可编程复杂混频器,支持高敏捷跳频;可编程 anti-sinc 滤波器;数字上变频和多器件同步。



EV12PS640 概念款 ADC 是一款单通道器件，支持用于波束形成的链式同步功能。在单端 ADC 输入时，它最高支持 30GHz 的直接射频（RF）采样，如图 2 所示。单端输入使接收器信号路径的设计无需使用射频巴伦，从而避免相关的信号失真和带宽限制。它的采样率高达 12.8Gsp/s，最大奈奎斯特域(NZ)为 6.4GHz。

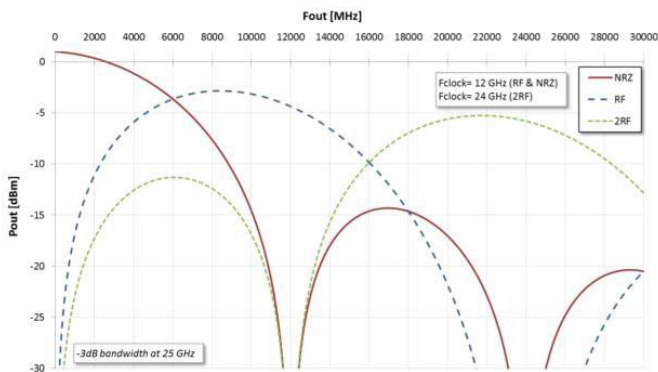


图 1 不同 DAC 工作模式下的 DAC 输出功率 vs 输出频率

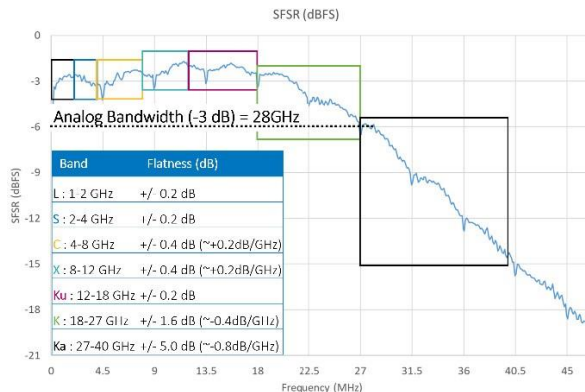
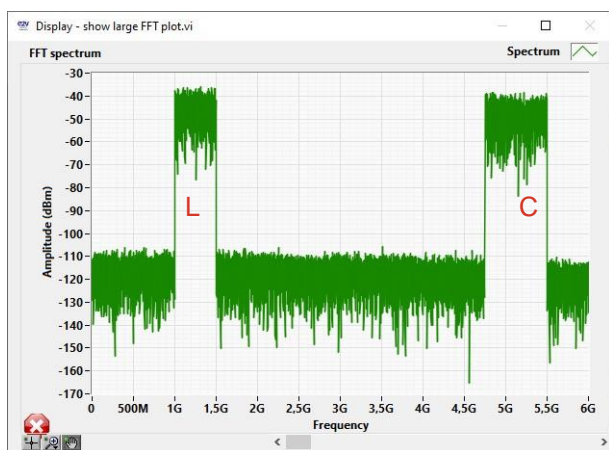


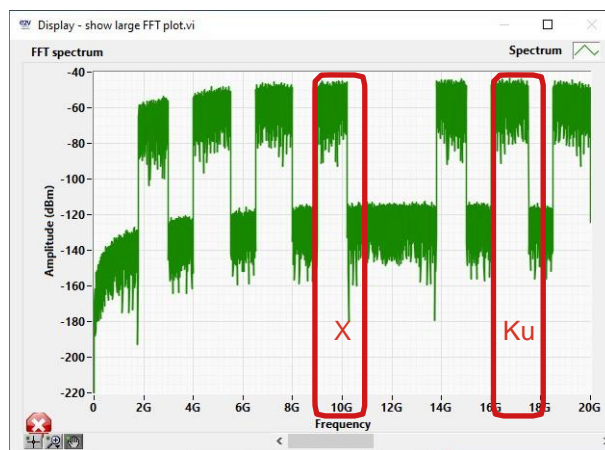
图 2 单端信号的输入带宽性能

初步架构

本文提出了一种全数字四波段 SAR。由于采样率高达 12Gsp/s，任意 1-1.5GHz 的 L 波段波形和 4.75 到 5.5GHz 的 C 波段信号可在非归零（NRZ）模式下同时直接合成而不发生重叠。此外，由于在 RF 模式下 DAC 可工作在多个 NZ 中，X 波段的波形可在第二奈奎斯特域中产生，同时在第三奈奎斯特域中产生 Ku 波段的波形。特别是，X 波段的 9-10.2GHz 可与 Ku 波段的 16-17.5GHz 一起生成。图 3 展示了 DAC 输出的噪声波形频谱。



a) L+C 波段，NRZ 模式，第 1 奈奎斯特域



b) X+Ku 波段，RF 模式，第 2 和第 3 奈奎斯特域

图 3 DAC 输出噪声频谱



为了避免混叠，DAC 的 NRZ 输出在 5.5GHz 进行低通滤波。然后，它被放大并发送至宽带天线。而 RF 输出则使用双波段滤波器进行滤波，以选择出第 2 奈奎斯特域的 X 波段和第 3 奈奎斯特域的 Ku 波段，如图 3b 所示。

图 4 所示的多波段 SAR 架构采用了脉冲雷达方案。因此，连接接收链的两根天线各使用一个环行器。与 DAC 输出类似，在使用两个工作在相同的 12GHz 采样时钟的 ADC 对接收信号放大和数字化之前，需先对其进行 L+C 通道的低通滤波和 X+Ku 通道的双波段滤波。

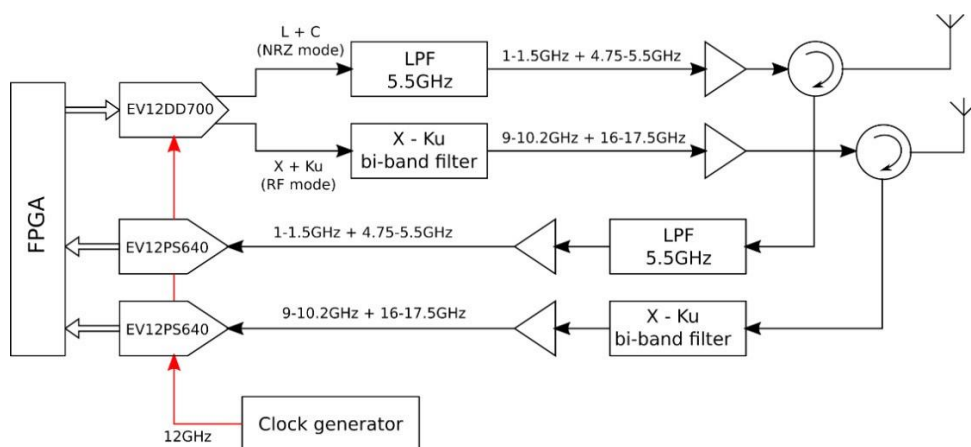
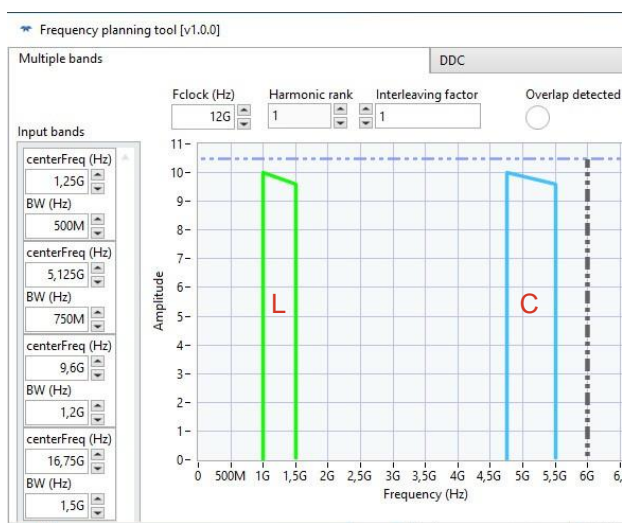
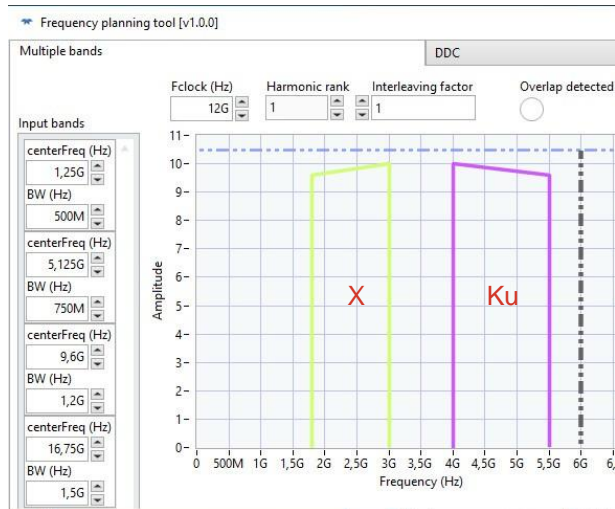


图 4 多波段 SAR 架构

图 5 给出了两种 ADC 的频率规划。L 波段和 C 波段可直接采样而不发生混叠，因为它们都落在第 1 奈奎斯特域 (6GHz) 的范围内。另一方面，由于 X 波段和 Ku 波段位于第 2 奈奎斯特域和第 3 奈奎斯特域，它们分别对应于第 1 奈奎斯特域的 1.8-3GHz 和 4-5.5GHz 的范围，没有重叠。高性能的现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 可实现任意波形发生器的功能，用于合成所需的雷达信号并处理从 ADC 到高速固态硬盘 (SSD) 的高速数字信号。



a) L+C 波段



b) X+Ku 波段

图 5 第 1 奈奎斯特域的 ADC 频率规划



在前端架构中，输入和输出滤波器尤其重要。输出滤波器是选择所需的波段和抑制无关的混叠波段的必要器件。另一方面，为了防止其他带外信号的干扰并降低整体噪声水平，需使用输入滤波器滤除噪声和无关信号。这些滤波器可使用多波段滤波器技术在微带上设计并实现。另一个选项是将宽带信号分成两个单独的波段，使用单波段滤波器滤波，然后重新组合。

为了使 DAC 的输出电平与功率放大器的输入端所需的电平匹配，我们需要使用中间驱动器。功率放大器应能够处理合适的功率，以满足每个频段的发射功率要求。由于系统是基于脉冲的，因此有必要考虑传输功率的平均值，这可简化放大器的选择。为了使发射器和接收器共用同一个天线，功率放大器的输出端的宽带环行器是必须使用的器件。

在接收端，根据发射功率的不同，需采用功率限制器件对低噪声放大器（LNA）进行保护。否则，如果环行器的隔离度不够（通常为 20dB），在传输的阶段可能损坏低噪声放大器。

机载系统演示样机的研制

所有的 4 个工作频段使用单一天线可实现 SAR 成像的单相中心。然而，考虑到实际的增益和天线尺寸，单天线很难容纳从 1GHz 到 18GHz 的超宽频率跨度。此外，由于 L 波段和 C 波段使用相同的 DAC 和 ADC 进行合成和数字化，X 波段和 Ku 波段也是如此，我们可方便地实现两个单独的模拟链路，如图 4 所示。

对于机载应用，L 波段和 C 波段可使用宽带喇叭天线（如 Ainfo LB-560[6]）进行发射和接收，这款天线支持 0.5-6GHz 的频率范围的 10-12dBi 的恒定增益，如图 6 所示。另一方面，多倍频程喇叭天线（如 Ainfo LB-60180-20[7]）拥有 6-18GHz 的带宽，支持 X 波段和 Ku 波段，X 波段的增益约为 20dBi，Ku 波段的增益约为 22dBi，如图 7 所示。

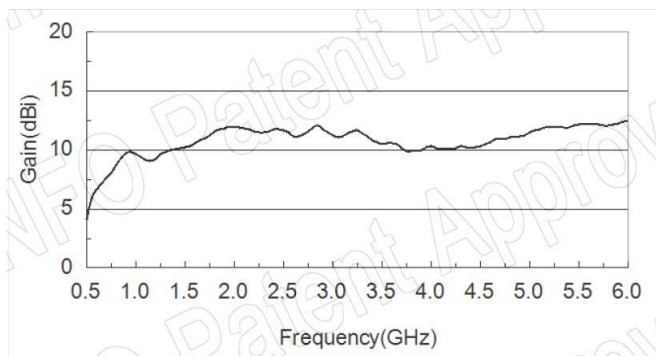


图 6 LB-560 宽带天线增益

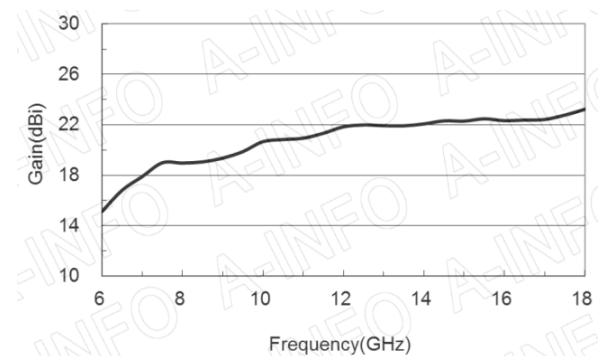


图 7 LB-60180-20 多倍频程天线增益

对于 L+C 波段，可使用 RF-Lambda 的功率放大器 RFLUPA0706GG[8]进行功率放大，其典型功率输出为 48dBm，频率范围是 0.7-6GHz。对于 X+Ku 波段，可使用 RF-Lambda 的 RFLUPA0618GE[9]放大器，其典型输出功率是 50dBm，频率范围是 6-18GHz。



功率放大器的输出可能需要使用带通谐波抑制滤波器。在这种情况下，根据发射功率的不同，应仔细评估微带功率的处理。对于 X+Ku 波段的高功率宽带环行器，一个可行的选择是 DORADO 国际的 4CCM14-1[10]同轴型号，它可覆盖 9-18GHz 的范围，功率为 150W。在 L+C 波段的情况下，很难找到一款具有如此大分数带宽的环行器。另一个选择是采用大功率同轴开关，例如 RF-Lambda 的 RFSP2TR5M06GS[11]。

在这样的高频数字系统中，低抖动的时钟信号是必不可少的。时钟发生器可使用基于锁相环的信号合成器来实现。Analog Devices 的微波合成器 ADF4152 集成了压控振荡器，可实现优秀的噪声特性[12]。时钟分配器可使用高频窄带分配器来实现。

Hitech Global HTG-960 Virtex UltraScale+ VU19P 开发平台[13]是一款优秀的 FPGA 板卡，支持通过 FMC 标准与 DAC 和 ADC 连接。FMC 接口还允许连接到非易失性内存主机控制器接口规范 (NVMe) 的高速 SSD (Raid0 配置)，以记录采集的数据。

该系统的功能可在轻型飞机上演示，如 Tecnam P92JS SmartBay[14]，它支持在机翼下的专用吊舱中安装实验设备。

预期的雷达性能

至此我们已经介绍了所需的所有系统组件，可根据表 1 中的参数计算预期的 SAR 性能。我们已经考虑了损耗和噪声的保守值，并假定飞行平台在平均地面高度之上 2000m 的高度以 40m/s 的地面速度飞行。

Parameter	Symbol	Units	L	C	X	Ku
Central frequency	f_0	GHz	1.25	5.125	9.6	16.75
Transmit power peak	P_t	dBm	45	45	47	47
Signal bandwidth	B_s	MHz	500	750	1200	1500
Repetition frequency	PRF	Hz	2000	8000	10000	12000
Duty cycle	η	%	10	10	10	10
Pulse duration	T_i	μ s	50	12.5	10	8.33
Noise figure	FN	dB	8	8	8	8
Receiver bandwidth	B_r	MHz	600	900	1440	1800
Radio frequency loss	LRF	dB	6	6	6	6
Signal processing loss	LDSP	dB	6	6	6	6
Antenna gain	G_a	dBi	10	12	20	22
Antenna elevation -3dB beamwidth	θ_{el}	deg	47.69	39.40	14.46	9.03
Antenna azimuth -3dB beamwidth	θ_{az}	deg	43.83	47.84	16.18	9.87
Antenna depression angle	Ψ	deg	-35	-35	-45	-45
Slant range resolution (nominal)	dr	cm	30	20	12.5	10
Slant range min (@-3dB antenna)	r_{min}	m	2337	2451	2530	2630
Slant range max (@-3dB antenna)	r_{max}	m	10369	7591	3266	3081
Swath (@-3dB antenna)	Δr	m	8032	5141	736	451
Synthetic aperture length	L_{SAR}	m	2806	3094	804	488
Integration time	CPI	s	84.19	92.82	24.12	14.66

表1 仿真参数



参考上述参数，可依据下式计算不同波段的 NESZ[15]。

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

其中 k_B 为玻尔兹曼常数， T_N 为 290°K 的参考温度， r_0 是刈幅中心的倾斜范围。假设分布反射为 $0\text{dBm}^2/\text{m}^2$ ，图 8 展示了各子波段的地块接收功率和倾斜范围的函数关系。天线的整个 -3dB 范围的总集成功率也被标出。由于 L 波段和 C 波段共享 LB-560 天线，其半功率波束宽度大于 39 度仰角，L 波段的频率的刈幅非常大，从 2337m 到 10369m。尽管 LB-560 天线在 L 波段和 C 波段的增益几乎相同，但由于自由空间的衰减不同，C 波段的接收功率比 L 波段低 20dB。另一方面，X 波段和 Ku 波段共享更直接的 LB-60180-20，因此在这两个更高的波段的刈幅更窄。

图 9 展示了期望的 NESZ 和不同子波段的倾斜范围的函数关系。期望的 NESZ 在 Ku 波段和 X 波段分别优于 $-23\text{dBm}^2/\text{m}^2$ 和 $-25\text{dBm}^2/\text{m}^2$ 。低频天线的范围允许 SAR 在 L 波段产生高达 10km 的成像，但灵敏度较差。由于通常认为优于 $-20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ 的 NESZ 值表征良好的 SAR 成像质量，L 波段和 C 波段的最大成像范围被分别限制在 5819m 和 4092m。

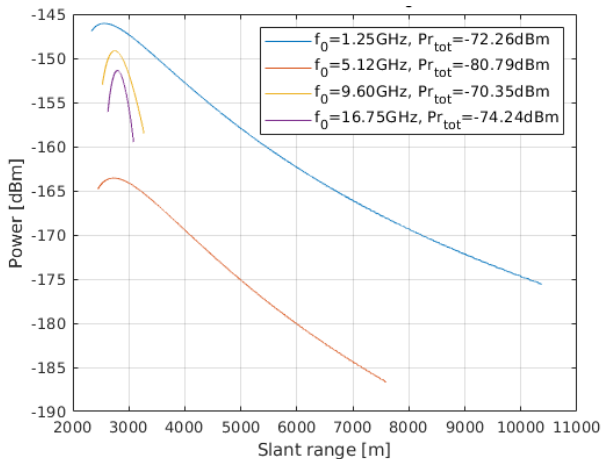


图 8 接收的功率，假设 $\sigma^0 = 0\text{dBm}^2/\text{m}^2$

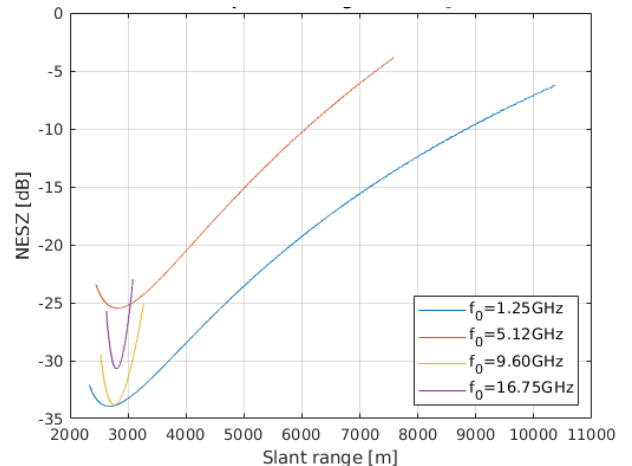


图 9 NESZ

机载处理和预期数据率

为了降低需记录的数据的数据率，我们需要对四个波段的接收信号进行机载采样和预处理，如图 10 所示。具体地说，每个采样波段都分别依据第一奈奎斯特域的中心频率数字下变频(DDC)到基带。然后，通过级联积分梳(CIC)滤波器对采样率进行抽取，以适应瞬时带宽。我们还需使用有限脉冲响应(FIR)滤波器对 CIC 滤波器的响应进行补偿。然后，使用交叉相关器(Xcorr)对已滤波的信号进行范围压缩，并将其限制在每个波段 4 倍过采样的范围以内。最后，经过合成的 6160MB/s 的数据率被发送到双通道 Raid0 Gen.4 NVMe IP[16]中，这个 IP 将压缩的数据以 3080MB/s 的数据率分别写入两个 Gen.4 NVMe SSD 中[17]。

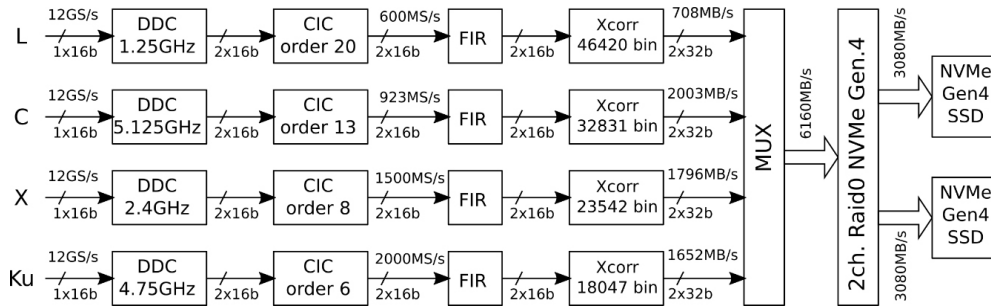


图 10 机载处理架构

结论和展望

本文对一种在 L、C、X 和 Ku 波段工作的全数字多波段 SAR 系统进行了可行性研究。首先介绍了 Teledyne e2v 的创新的 DAC 和 ADC 的关键技术，然后提出了一种基于脉冲的 SAR 系统的初步架构，最后以几种商业器件和技术为例，评估了空中多波段 SAR 成像的机载演示系统的可行性。此外，本文也以 NESZ、接收功率和数据率的形式推导和分析了预期的性能。

未来我们将会对系统性能进行更详细的分析，包括脉冲响应、相位线性度和杂散水平，然后进行所述的机载多波段 SAR 演示样机的开发工作。这个演示样机是更广阔的技术路线图的第一步。我们期待未来会有更新的设计，并由新的宇航机构和私营公司推动航天载荷的发展。

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/

更多信息，请联系：



Daniele Stagliano
首席执行官

daniele.stagliano@echoes-tech.it



Nicolas Chantier
市场总监

信号和数据处理解决方案

nicolas.chantier@teledyne.com

