

Adaptacyjne technologie w przestrzeni kosmicznej: Nowe możliwości dla europejskich misji



Politechnika
Śląska

Wojciech Sikorski
Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki



<https://space.skyrocket.de>



<https://www.esa.int>

Układy FPGA (Field-Programmable Gate Array) to programowalne układy logiczne, które pozwalają na wielokrotną zmianę konfiguracji. W przeciwieństwie do wyspecjalizowanych układów scalonych (ASIC), FPGA można modyfikować bez potrzeby demontażu, co czyni je niezwykle przydatnymi w sytuacjach wymagających elastyczności w projektowaniu i prototypowaniu. W ostatnich latach technologia ta znalazła szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach m.in. w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów, lotnictwie, przemyśle wojskowym. Szczególnie istotne stało się jej wykorzystanie w misjach kosmicznych, gdzie adaptacyjność i niezawodność systemów są kluczowe.

Wykorzystanie w Europejskich misjach kosmicznych

W misjach kosmicznych kluczowym wyzwaniem jest dostosowywanie się do zmieniających się warunków. Tradycyjne układy elektroniczne po wyprodukowaniu nie mogą być modyfikowane, co ogranicza ich adaptację. Rozwiązaniem są rekonfigurowane układy FPGA, które pozwalają zmieniać swoją konfigurację już na pokładzie satelitów po ich wystrojeniu.

Przykładem takiego zastosowania jest niemiecki satelita Heinrich Hertz (H2Sat), wyniesiony na orbitę w lipcu 2023 roku. Jego celem jest testowanie nowych technologii komunikacyjnych w kosmosie. H2Sat wykorzystuje transponder oparty na procesorze FPGA, który przetwarza sygnały z Ziemi i retransmituje je na inne częstotliwości. Dzięki możliwości rekonfiguracji procesor może być aktualizowany w trakcie misji, np. aby wprowadzić nowy standardy telekomunikacyjny.

Kolejnym przykładem jest misja Solar Orbiter, wystrzelona w 2020 roku w celu badania Słońca i heliosfery. Satelita wyposażony w instrumenty PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager) które generują dużą ilość danych (około 3,2 Gb na minutę na każdy z dwóch detektorów), przekraczając wydajność systemu komunikacji z Ziemi. Dlatego przetwarzanie danych odbywa się bezpośrednio na pokładzie. Częściowa rekonfiguracja FPGA pozwala na dynamiczne dostosowanie przetwarzania do aktualnych potrzeb, zmniejszając ilość danych do przesłania i obciążając łączy telemetrii, co zwiększa niezawodność w trudnych warunkach kosmicznych.

Zapewnienie odporności na promieniowanie

W przestrzeni kosmicznej wysokie promieniowanie może powodować błędy typu SEU (Single-Event Upset) w układach elektronicznych, wynikające z kolizji cząstek o wysokiej energii z elementami krzemowymi. Tradycyjnie stosowana potrójna redundancja modułowa (TMR), czyli trzykrotne powielenie każdej istotnej jednostki logicznej, zwiększa odporność na błędy, ale wiąże się z dużym zużyciem zasobów i energii. Nowoczesnym podejściem do tego problemu, które jest możliwe tylko podczas korzystania z FPGA, jest dynamiczna tolerancja błędów (RFT), która dostosowuje poziom redundancji do aktualnych warunków promieniowania. W obszarach o niskim promieniowaniu system redukuje redundancję, co uwalnia zasoby do przetwarzania danych, a w miejscach o wysokim promieniowaniu zwiększa ją, zapewniając wyższą ochronę.

Zastosowanie w sieciach neuronowych

Współczesne satelity generują ogromne ilości danych, co powoduje że niemożliwe jest przesłanie ich na ziemię. Coraz częściej stosuje się głębokie sieci konwolucyjne (CNN) do automatycznego przetwarzania i interpretacji tych danych na orbicie. Implementacja CNN bezpośrednio na pokładzie satelity umożliwia szybsze podejmowanie decyzji i zmniejsza ilość przesyłanych danych. Układy FPGA są idealną platformą do implementacji CNN w satelitach ze względu na niższe zużycie energii i elastyczność, co pozwala na reprogramowanie lub aktualizowanie wag modelu w trakcie misji. Jednak implementacja CNN na FPGA wymaga optymalizacji zasobów sprzętowych. Narzędzia takie jak CNN2Gate automatyzują konwersję modeli CNN na wersje gotowe do implementacji na FPGA, co ułatwia ich wdrożenie. Testy z modelami jak AlexNet i VGG-16 pokazały, że można znacząco skrócić czas klasyfikacji i efektywnie wykorzystać zasoby, co umożliwia zaawansowane przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym na satelitach.

Podsumowanie

Rekonfigurowalne układy FPGA są kluczowe w nowoczesnych misjach kosmicznych, oferując elastyczność i niezawodność w trudnych warunkach. W przyszłości te rozwiązania będą coraz częściej stosowane, pozwalając na realizację bardziej złożonych misji naukowych, jednocześnie obniżając koszty i zwiększając trwałość satelitów.

Słowa kluczowe: FPGA, tolerancja błędów, sieci neuronowe, promieniowanie kosmiczne, optymalizacja.

- Bibliografia:
1. Montealegre, N., Merodio, D., Fernández, A., & Armbruster, P. (2015). *In-Flight Reconfigurable FPGA-Based Space Systems*. In Proceedings of the NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). doi: 10.1109/ahs.2015.7231177
 2. Jacobs, A., Cieslewski, G., George, A. D., Gordon-Ross, A., & Lam, H. (2012). *Reconfigurable Fault Tolerance: A Comprehensive Framework for Reliable and Adaptive FPGA-Based Space Computing*. ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems, 5(4), Article 21. doi: 10.1145/2392616.2392619
 3. Motamedi, M., Gysel, P., Akella, V., & Ghiasi, S. (2016). *Design Space Exploration of FPGA-Based Deep Convolutional Neural Networks*. In Proceedings of the 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC) (pp. 575-580). doi: 10.1109/aspdac.2016.7428073
 4. Ghaffari, A., & Savaria, Y. (2020). *CNN2Gate: An Implementation of Convolutional Neural Networks Inference on FPGAs with Automated Design Space Exploration*. Electronics, 9(12), 2200. doi: 10.3390/electronics9122200
 5. Qin, J. X., Yang, J., Qu, Z., & Wang, Y. X. (2018). *A Mission Oriented Reconfiguration Technology for Spaceborne FPGA*. Journal of Physics: Conference Series, 1195(1), 012012. doi: 10.1088/1742-6596/1195/1/012012
 6. Bekker, D. L., & Tran, M. Q. P. (2019). *Performance Analysis of Standalone and In-FPGA LEON3 Processors for Use in Deep Space Missions*. In Proceedings of the 2019 IEEE Aerospace Conference (pp. 1-9). doi: 10.1109/AERO.2019.8742194



<https://polsa.gov.pl>