

# RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

Proiect 680PED/2022 – “PROFET”

Poziționarea precisă pe orbită a unui satelit folosind  
tehnici de fuziune de date și estimare bazată pe model

*Raportare Etapa 3: 30 iunie 2024*

## Cuprins

<b>1 Rezumatul etapei 3</b>	1
<b>2 Raportul in extenso pe 2024</b>	2
<b>2.1 Simulare HIL</b>	2
<b>2.2 Testare TVAC</b>	2
<b>2.3 Definirea platformei de interfațare</b>	5
2.3.1 <i>Aspecte legate de programarea interfeței</i>	7
<b>2.4 Publicarea de articole științifice</b>	8

## 1 Rezumatul etapei 3

Primul obiectiv al acestei etape a fost simularea HIL (A-3.1). Apoi, s-a făcut testarea TVAC (A-3.2), continuând cu definirea platformei de interfațare (A-3.3). Activitatea de cercetare în cadrul proiectului a culminat cu elaborarea raportului final (A-3.4).

Toate aceste activități s-au concretizat prin livrabilele:

- D-5.1** *raport tehnic privind simulările HIL;*
- D-5.2** *raport tehnic privind testele experimentale;*
- D-6.1** *diseminarea rezultatelor în mediul academic.*
- D-6.2** *actualizarea rezultatelor pe pagina de internet.*
- D-6.3** *raport tehnic final.*

Cele două rapoarte tehnice de la livrabilele D-5.1 și D-5.2 au fost integrate în materialul final pentru realizarea unui document unitar, care să illustreze într-o manieră coerentă desfășurarea activităților pentru urmărirea obiectivelor propuse pentru Etapa 3 pe 2024 a proiectului de cercetare PROFET.

## 2 Raportul in extenso pe 2024

### 2.1 Simulare HIL

Etapele anterioare s-au concentrat pe dezvoltarea independentă a componentei hardware și a componentei software (reprezentată de transpunerea algoritmilor în cod sursă). Etapa finală a proiectului a avut ca obiectiv primar integrarea celor două componente și demonstrarea lor, în primul rând în condiții normale de laborator, urmată de verificări în condiții de vid.



Figura 1: Versiunea finală a subsistemului PROFET

Demonstrarea funcțională s-a realizat pe hardware-ul dezvoltat în cadrul proiectului. Experimentul s-a desfășurat după cum urmează: algoritmul de predicție a orbitei satelitului a rulat într-o buclă infinită, pornind de fiecare dată de la același vector de stare inițial, pentru a observa eventualele erori numerice datorate diferitelor temperaturi. De asemenea, s-a monitorizat efectul condițiilor de temperatură și presiune asupra timpului de calcul. Interfața cu receptorul GNSS a fost simulată prin utilizarea unui fișier de date, astfel încât vectorul de stare să fie inițializat corespunzător, ca și cum datele ar fi fost preluate direct de la receptor. De asemenea, traiectoria calculată de sistemul PROFET a fost salvată într-un fișier text, stocând toate datele din timpul experimentului.

### 2.2 Testare TVAC

Testarea TVAC implică verificarea supraviețuirii în vid a subsistemului la variații de temperatură conform domeniului așteptat de funcționare de la bordul satelitului. Operarea în vid implică lipsa transferului termic prin convecție și limitarea capacității de a conduce căldura între zone diferite ale sistemului. Astfel, pot apărea neomogenități termice mult mai mari decât în condițiile normale de presiune, ceea ce poate conduce la nefuncționarea, oprirea sau defectarea permanentă a unora dintre componentele sistemului. Un alt risc este acela al spargerii capsulelor pentru unele componente presurizate (e.g., anumiți condensatori electrolitici).

Testarea s-a făcut pe echipamentul proiectat și fabricat în cadrul proiectului, pe baza procesorului din seria NXP i.MX 6ULL. Testul a avut următoarele caracteristici principale:

1. Testarea funcțională (nu doar pasivă);
2. Domeniu termic:  $T_{min} = -20^{\circ} \text{ C}$ ,  $T_{max} = +70^{\circ} \text{ C}$ ;
3. Presiune maximă la vid  $10^{-4} \text{ hPa}$ ;
4. Procedură bazată pe standardele ESA (ECSS-E-ST-10-03C):
  - a) Test funcțional de referință la montarea în instalația de vid;
  - b) Test funcțional în vid;
  - c) Teste la palier termic (temperatură minimă și maximă) - necesare pentru uniformizarea temperaturii;
  - d) Menținerea temperaturii la palier în intervalele  $[T_{min}, T_{min} - 4K]$ , respectiv  $[T_{max}, T_{max} + 4K]$ ;
  - e) Timpul de palier a fost redus la 1 oră (de la 2 ore), date fiind dimensiunile mici ale echipamentului testat;
  - f) Dispozitiv nefuncțional până la atingerea extremelor termice;
  - g) Testare funcțională la minim și maxim;
  - h) Revenire la temperatură ambiantală și test funcțional pentru represurizare;
  - i) Test funcțional la demontare.

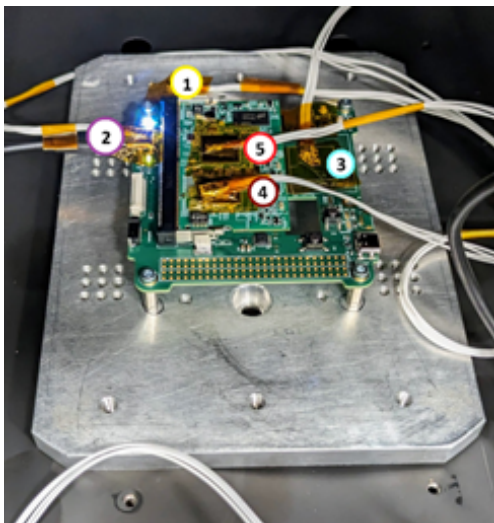


Figura 2: Senzorii de temperatură

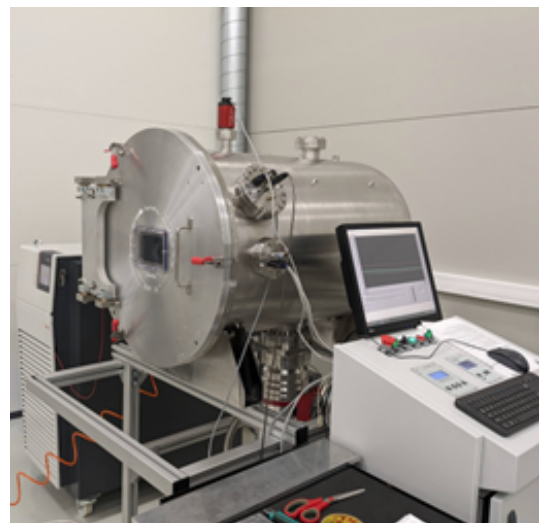


Figura 3: Incinta de vid

Cinci senzori de temperatură de tip PT1000 au fost dispuși în incintă astfel:

0. Senzorul 0 (culoare gri-deschis) fixat pe vâlul radiant (shroud – elementul radiativ al incintei de vid care controlează temperatura în interior);
1. Senzorul 1 (culoare galben) fixat pe placa de aluminiu pe care este montat subsistemul PROFET;
2. Senzorul 2 (culoare magenta) fixat pe conectorul USB-C care asigură transferul de date și alimentarea electrică a dispozitivului testat;
3. Senzorul 3 (culoare cyan) fixat pe porțiunea circuitului imprimat de bază rezervată pentru senzorul GNSS;
4. Senzorul 4 (culoare roșu închis) fixat pe suportul de card de memorie SD al cablajului de procesare;
5. Senzorul 5 (culoare roșu) fixat pe procesorul principal al sistemului.

Sistemul de achiziție de date a înregistrat continuu datele de la acești senzori, precum și de la senzorul de presiune montat pe incintă.

Punctul de referință termică, cel care dictează atingerea domeniului de temperatură țintă, a fost ales chiar pe procesorul i.MX 6ULL. Prin așteptarea unui timp de o oră la palierele de minim și de maxim s-a asigurat uniformizarea termică înainte de începerea fiecărui test la mai puțin de 5 grade pentru subsistemul PROFET. În fapt, în unele puncte ale sistemului, testele au fost mai aproape de  $-25^{\circ}\text{C}$  și de  $+75^{\circ}\text{C}$ , ceea ce dă un grad mare de încredere în rezultatele obținute.

Graficul din Fig. 4 prezintă evoluția temperaturilor și a presiunii în timpul desfășurării testului de vid. Temperatura corespunzătoare fiecărui senzor este prezentată pe scara din stânga și urmărește același cod al culorilor. Presiunea în incintă este reprezentată cu verde închis pe scara din dreapta, de data aceasta logaritmică. Excursia totală de presiune este de aproximativ 7 ordine de mărime, testele funcționale de extrem realizându-se la presiuni mai mici de  $10^{-5}$  hPa, conform cerințelor ECSS.

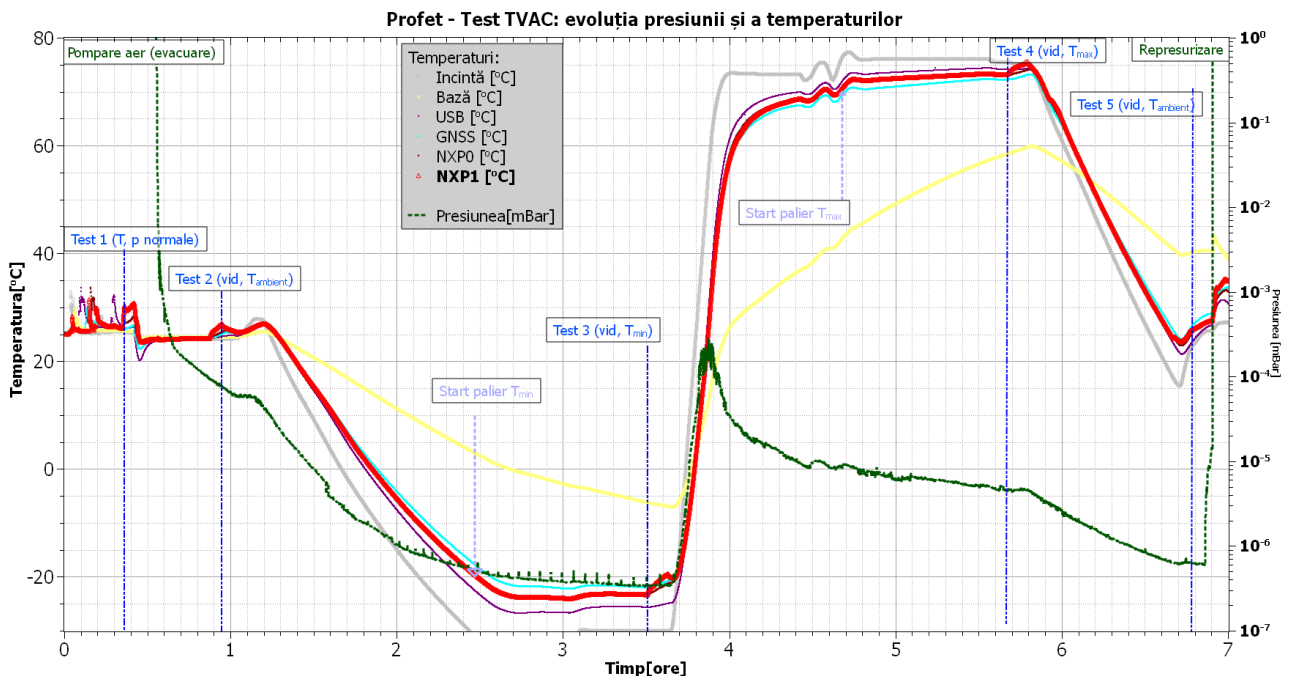


Figura 4: Graficul de execuție a testului TVAC

Durata totală a testului este de aproximativ 7 ore, iar primele 30 de minute sunt reprezentate de montarea și conectarea în interiorul incintei de vid. Sunt urmate de închiderea incintei și pornirea sistemului de pompare, realizarea testului în vid la condiții termice ambientale. Ulterior confirmării operării nominale, a fost comandată trecerea spre temperaturile țintă ale domeniului, pornind cu palierul rece.

Se poate observa că temperatura procesorului crește la fiecare pornire, așa cum era de așteptat. Pot fi astfel identificate testele efectuate la temperatură ambientală și în vid la temperaturile comandate.

Din punct de vedere funcțional, pe lângă pornirea sistemului de operare, rularea nominală și stocarea datelor pe cardul de memorie, procedura de verificare a inclus și executarea codului pentru un set de condiții date, aceasta pentru a putea permit compararea valorilor rezultate și identificarea eventualelor erori în calcule. În urma testelor a fost confirmată capacitatea subsistemului PROFET de a rula codul fără nicio diferență între rezultatele obținute înainte, în timpul sau la sfârșitul testului.

Din cauza depășirii temperaturii de 60° C, s-a constatat intrarea în modul de protecție termică prin reducerea frecvenței de operare. Acest lucru este vizibil prin creșterea timpului de execuție al programului prestabilit. La finalul testului de temperatură maximă, s-a observat intrarea procesorului în standby din cauza temperaturii prea mari măsurată pe joncțiune. După ce această condiție a încetat, procesorul și-a reluat funcționarea normală.

Trebuie menționat că protecția termică este un comportament dorit, care are rol în a reduce consumul de putere și a opri creșterea de temperatură excesivă ce ar putea conduce la defectarea sistemului. El a fost amplificat pentru că, prin instalația de testare, s-a adăugat constant aport caloric în sistem care nu a permis stabilizarea temperaturii.

### 2.3 Definirea platformei de interfațare

Pentru a susține integrarea cât mai facilă la bordul sateliților, proiectarea subsistemului s-a făcut pe baza factorului de formă PC/104, standard de facto apărut odată cu platforma de dezvoltare CubeSat Kit, introdusă de Pumpkin Inc. Aceasta asigură o compatibilitate de bază cu majoritatea sistemelor comerciale, cel puțin la nivel de configurație mecanică, alocarea semnalelor pe liniile magistralei putând fi adaptată în stiva de subsisteme.

Astfel, subsistemul PROFET dezvoltat și testat se poate stivui direct peste un subsistem OrbFIX care include receptorul GNSS performant, dezvoltat de RISE pentru sateliți aflați pe orbită terestră joasă. Astfel, modulul PROFET poate primi în timp real date de poziție, viteză și timp, ceea ce îi permite inițializarea estimatorului cu precizie înaltă. Prin utilizarea semnalului Galileo E6 HAS (High Accuracy Services - servicii de precizie înaltă), precizia la poziționarea instantanee a OrbFIX este mai bună de 20 cm, ceea ce îmbunătățește și precizia propagatorului de orbită.

Prin intermediul magistralei sunt expuse:

- Interfața UART venită din portul 3 al NXP, cu “flow control”
- Interfața RS485
- Interfața CAN
- Alimentare la 3.3 V

Pentru misiuni unde cerințele de masă, volum și putere sunt stricte, subsistemului PROFET i se poate monta un receptor GNSS direct, de data asta cu o precizie mai mică (1 – 2 m) și cu redundanță scăzută. În acest mod, subsistemul dezvoltat integrează complet lanțul necesar estimării complete a poziției și vitezei satelitului, precum și a evoluției temporale a acestora. Sunt necesare doar conectarea antenei GNSS, alimentarea cu energie electrică și interfața de date de comunicare cu subsistemul computer de bord.



În acest scop, se folosește un modul de recepție GNSS montabil direct pe cablajul subsistemului PROFET, conexiunea între acesta și procesor realizându-se tot prin intermediul unei interfețe UART.

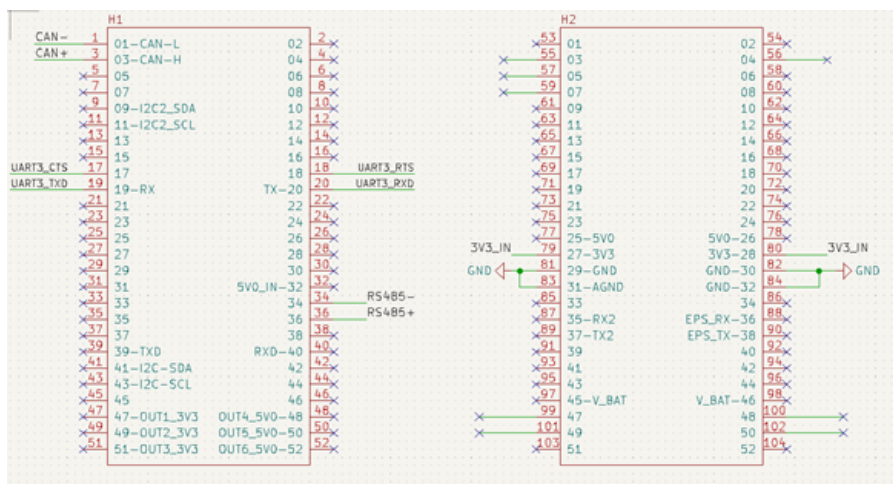


Figura 5: Alocarea semnalelor pe magistrala PC104 din CubeSat Kit

Pentru conexiunea externă sunt disponibile două interfețe USB (conector USB-C), care realizează și alimentarea independentă a întregului cablaj. Fiecare are montat în serie câte un convertor USB la UART prin care utilizatorul se poate conecta într-o interfață de tip linie de comandă de la un PC atât la procesorul NXP, cât și la modulul de recepție GNSS.

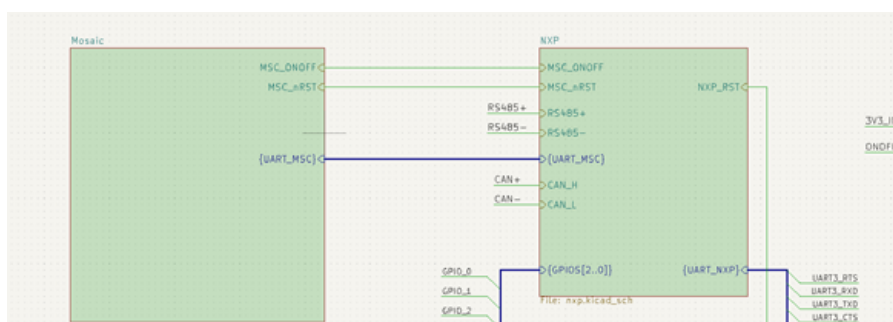


Figura 6: Conectarea receptorului GNSS la procesorul NXP

### 2.3.1 Aspecte legate de programarea interfeței

Funcția principală care realizează implementarea (în C a) estimatorului de înaltă precizie este HPOP din fisierul HPOP.c. Aceasta are următorul antet:

```
void HPOP(double b_dd[], emxArray_real_T *Eph_ecef, emxArray_real_T *Eph_eci)
```

Cei trei parametri observați în antet, care sunt preluați din implementarea echivalentă MATLAB, sunt de fapt parametri de ieșire. Conform implementării MATLAB, aceștia erau anterior calculați în script-ul `test_HPOP.mat`.

Mai exact, acești trei parametri sunt definiți după cum urmează:

- `Eph_eci` este parametrul de ieșire în coordonate Earth Centered Inertial (ECI), generat de funcția de predicție `Ephemeris` din MATLAB. În varianta C, corpul acestei funcții este mutat în funcția HPOP (din `Hpop.c`).
- `Eph_ecef` este parametrul de ieșire în coordonate Earth Centered Earth Fixed (ECEF) generat de funcția de predicție `Ephemeris`.
- `b_dd` reprezintă eroarea de estimare. De asemenea, este un vector echivalent vectorului `error` din `test_HPOP.mat`.

Un exemplu de apel de funcție este în `examples/main_test.c`, funcția `main` și apoi `main_HPOP`. Se observă că memoria pentru `eci` și `ecef` este alocată dinamic în interiorul funcției, iar în forma curentă a conversiei eroarea `b_dd` este alocată pe stivă deoarece predicția este una de dimensiune fixă.

În varianta MATLAB, algoritmul funcției `Ephemeris` folosește fișiere `.txt` de pe disc sau tabele statice. În varianta de C, deși o parte din date sunt stocate în fișiere binare, se procesează același input în funcția HPOP pentru predicție. Algoritmul de bază nu a fost modificat, iar apelul funcției HPOP va crea la final predicția folosind același input.

Algoritmii de estimare codati în MATLAB au fost portați în C prin MATLAB CODER. De aceea, modificari viitoare ale algoritmilor (refactorizați) din Matlab se pot porta ușor în codul C prin același mecanism. Actualele date folosite la estimare, citite din fișierele binare/text, provin natural din stream-ul de date al satelitului. De exemplu, o dezvoltare viitoare utilă este implementarea în MATLAB a citirii datelor din fișiere în batch-uri pentru a controla mai bine memoria (respectiv CPU) folosite în algoritmi.

## 2.4 Publicarea de articole științifice

### Articole de revistă:

- J1) Diaconescu, S., **F. Stoican** și **B. D. Ciubotaru**. “Elastic Tube Model Predictive Control with Scaled Zonotopic Sets”. În: *IEEE Control Systems Letters*, pag. 1343–1348, **2024**. IEEE  
**IF: 3. Q2.**

### Articole de conferință:

- C1) **Mihai, Ș. S., F. Stoican**, M. Monnigmann și **B. D. Ciubotaru**. “Computing the explicit MPC solution in the constrained zonotope case (*submitted; under review*)”, pag. 1–6. În: *63rd Conference on Decision and Control*. **2024**. IEEE.

### Capitole de carte:

- B1) Diaconescu, S., **F. Stoican** și **B. D. Ciubotaru**. “Tube Model Predictive Control for Flexible Satellite Dynamics”, ISBN: 978-3031510489. În: *Advances in Discrete Dynamical Systems, Difference Equations, and Applications*, pag. 371–387, **2023**. Springer.
- B2) **Mihai, Ș. S., F. Stoican** și **B. D. Ciubotaru**. “Explicit MPC solution using Hasse diagrams: construction, storage and retrieval”, ISBN: 978-3031510489. În: *Advances in Discrete Dynamical Systems, Difference Equations, and Applications*, pag. 353–369, **2023**. Springer.

Director de proiect:  
conf.dr.ing. Bogdan D. Ciubotaru



**Referințe**

- [1] Diaconescu, S., **F. Stoican** și **B. D. Ciubotaru**. “Elastic Tube Model Predictive Control with Scaled Zonotopic Sets”. În: *IEEE Control Systems Letters*, pag. 1343–1348, **2024**.  
PUBLICAT DE: IEEE  
**IF: 3. Q2.**
- [2] **Mihai, Ș. S., F. Stoican**, M. Monnigmann și **B. D. Ciubotaru**. “Computing the explicit MPC solution in the constrained zonotope case (*submitted; under review*)”, pag. 1–6. În: *63rd Conference on Decision and Control*. **2024**.  
PUBLICAT DE: IEEE.
- [3] Diaconescu, S., **F. Stoican** și **B. D. Ciubotaru**. “Tube Model Predictive Control for Flexible Satellite Dynamics”, ISBN: 978-3031510489. În: *Advances in Discrete Dynamical Systems, Difference Equations, and Applications*, pag. 371–387, **2023**.  
PUBLICAT DE: Springer.
- [4] **Mihai, Ș. S., F. Stoican** și **B. D. Ciubotaru**. “Explicit MPC solution using Hasse diagrams: construction, storage and retrieval”, ISBN: 978-3031510489. În: *Advances in Discrete Dynamical Systems, Difference Equations, and Applications*, pag. 353–369, **2023**.  
PUBLICAT DE: Springer.