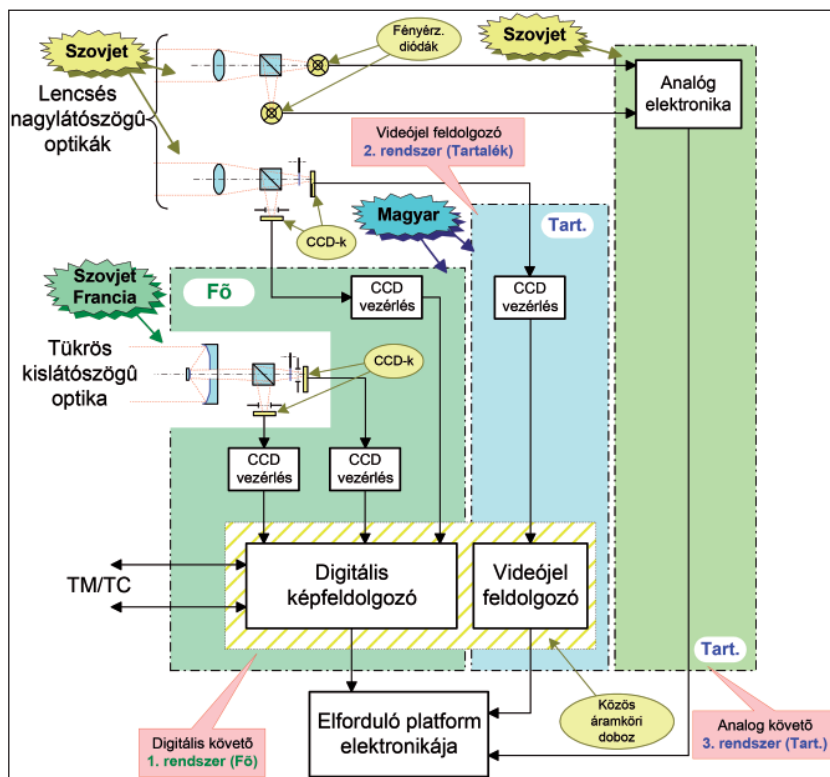


Dr. Szalai Sándor*

Két üstökös-kutató szonda mérnöki szemmel II. rész

Az orientációs hardver a képerzékelőkről érkező digitalizált képet 256×256 méretűvé redukálta. Ez történhetett tömörítéssel vagy a rész-kép kivágásával. A CCD-k egyedi pont-hibáinak, illetve hibás oszlopainak javítására egyedi áramköri megoldást alkalmaztunk. Az üstökös-mag gyors felismerése érdekében a kis számítási teljesítményű mikroprocesszor működésének gyorsítására célhardverek készültek. A célhardverek alkalmazása lehetővé tette, hogy a mintavételezés ideje 3,3 másodpercre csökkenjen, és így a kis látószögű kamera látószögéből az üstökös-mag nem tűnt el, még a legkritikusabb, közeli fázisban sem. Az áramkörök adataiból számolt pozíció alapján a processzor vezérelte a platform elfordulását.

A funkciószintű tartalékolás egyik leghatékonyabb módját tartalmazta a VEGA űrszondák követőrendszere. Itt a program kritikus elemét képező, üstökös-követő és képfeldolgozó rendszer egyazon célt szolgáló tartalék elemek különböző elvi megoldásokkal, eltérő technológiai megoldásokkal és eltérő alkatrész-készlet alapján, egymástól függetlenül fejlesztők készítették. Nem volt része a Magyarországon készült tévé-rendszernek a nagylátószögű optika mögötti, a nyolcszegmensű fényérzékelő diódák jeleit feldolgozó analóg áramkörökből felépült követőrendszer, amely Moszkvában készült. Ez kizárta mind az alkatrész-szintű, mind a tervezési szintű szisztematikus hibákat. A megbízhatóság érdekében a VEGA program két, azonos műszereket tartalmazó szondából állt. Az üstökös és magjának automatikus felismerésére digitális és két eltérő analóg megoldást alkalmaztunk. A felismert követési „pont” mindhárom megoldásban önállóan biztosította a platform vezérlését (5. ábra). A megközelítés közeli szakaszában a várható pályát a mikroprocesszoros digitális rendszer Kálmán-szűrő alkalmazásával prediktálta. Az optimális expozíciós időt CCD képerzékelőként dedikált áramkörök biztosították. Az egyszeres meghibásodás elleni védelem érdekében több alkatrészt tartalékoltan építettünk be (az órajel frekvenciáját biztosító kristályból három volt). Az alkatrész-

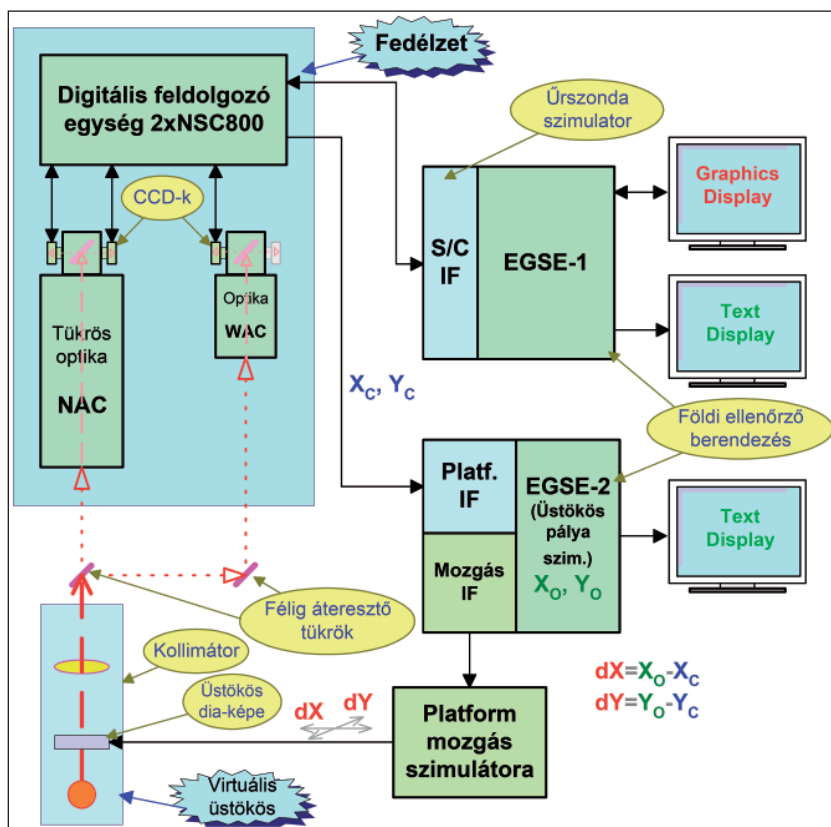


5. ábra. A VEGA űrszonda tartalékolat üstökös-követő rendszerének funkcionális blokkvázlata (Forrás: a szerző)

szek terhelhetőségét legalább kétszeresen túlméreteztük. Például a 70 V feszültségen működő elektromechanikus záruk áramkörébe 200 V-ot elviselő kondenzátorokat építettünk be. A programokat a memóriákban 8+4 bites hibajavító Hamming-kóddal tároltuk, a hibajavítást külön célhardver végezte. A mikroprocesszor a program futása közben az eltárolt ellenőrző összeg (check-sum) segítségével időnként ellenőrizte a PROM-ok helyes tartalmát. Az indítás és a bolygóközi repülés közben fellépő környezeti hatások elviselését bizonyítandó hő-vákuumkamrai és rezgésvizsgálatokkal teszteltük.

A követőrendszer helyes működését egy üstökös mozgását szimulálni képes, kollimátor alapú rendszer segítségével teszteltük. Ez a rendszer lehetővé tette az üstökös és szonda megközelítésekor a különböző relatív pályák szimulálását, és ellenőrizni lehetett a pályaszámító algo-

* Szalai Sándor villamosmérnök, az MTA doktora, a Wigner FK kutató professor emeritusa. A VEGA programban a képfelvévő és követő rendszer magyarországi projekt vezetője volt, eredményes munkájáért Állami Díjban részesült. Részt vett a Fobosz program leszálló egység központi számítógépének fejlesztésében. Közreműködött a Cassini szonda két műszerének fejlesztésénél, és az ISS-re került Obsztanovka műszer földi ellenőrző berendezések szoftvereit fejlesztette. A Rosetta programban a Philae központi számítógép rendszertervezésében és annak tesztelését támogató szoftverfejlesztésben vett részt, valamint a CDMS fejlesztés projektvezetője volt. Nyugdíjazásáig az Űrtechnikai Osztály vezetője volt. A Magyar Mérnökakadémia és a Nemzetközi Asztronautikai Akadémia rendes tagja. A Magyar Asztronautikai Társaság tiszteleti tagja, a Társaság Nagy Ernő- és Fonó Albert-emlékéremmel tüntette ki, valamint a NASA és két alkalommal az ESA munkásságát elismerő oklevélben részesítette.



6. ábra. A TV követőrendszer tesztelési környezete

ritmus működését (6. ábra). Tökéletes pálya-előrejelzés esetében az üstökös diaképe egyhelyben maradt ($dX = 0$ és $dY = 0$).

Az űrkutatás történetében először használtunk félvezető alapú képezékelőket, és először készült kép egy üstökös magjáról. Ez volt az első eset az űrkutatás történetében, hogy fedélzeti képfeldolgozás alapján valósult meg a vezérlés. A VEGA-1-es szonda mérési adatainak felhasználásával vált lehetővé az ESA Giotto szondájának az üstökös magjához közelebbi pályára való vezérlése.

A ROSETTA-PHILAE ŰRSZONDAPÁROS

A 2004. március 2-án indult űrszondapáros bonyolult pálya-bejárása után az üstökössel szinkron pályára állt, majd a Philae 2014. november 12-én „sima” leszállást hajtott végre annak magjára. Az űrszondapáros tíz évig tartó bolygóközi útja során többször megkerülte a Napot, háromszor elhaladt a Föld és egyszer a Mars mellett, 2008-ban találkozott a Steins, majd 2010-ben a Lutetia kisbolygóval. 2011. június 8-án hibernálták az űrszondapárost, mivel a pálya Jupiterhez közeli szakaszán a napelemek által szolgáltatott csekély energia csak a fedélzeti óra és néhány fűtőelem táplálását tudta biztosítani. 2014. január 20-án, 673 millió km-re a Naptól a Rosetta számítógépe felébredt, sorra bekapcsolta a szonda szolgálati egységeit, majd felvette a kapcsolatot a földi irányítóközponttal.

A Philae „agyát”, vagyis a központi számítógépét az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont és a hazai SGF Kft., míg a „szívét”, azaz az energiaellátó rendszert a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Űrkutató Csoportja fejlesztette. Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont részvételével fejlesztettek két mérőműszert. A tízéves

bolygóközi repülés közben a kutatók sok új ismeretet szereztek a célba vett üstökösről, így a magyar szoftverfejlesztőknek pontosítani kellett a leszállóegység szoftverét, hogy hiba nélkül valósuljon meg a történelmi küldetés. A szoftver végső változatát 2014. március 28-án küldték fel a leszállóegység számítógépébe.

A központi számítógép (Command and Data Management Subsystem – CDMS) a Philae 15 egysége működését felügyelte (7. ábra). A CDMS a hosszú időtartamú küldetés során folyamatosan ellenőrizte a tudományos műszereket és a szolgálati alrendszereket. A megközelítést követően előkészítette a leszállóegység és a keringő egység (Rosetta anyaszonda) szétválasztását, vezérelte a felszínre történő leszállást és felszínhez rögzítést, miközben a tudományos műszereket működtette. A felszínen a hőmérsékletet szabályozta és az energiaelosztást vezérelte az üstökösön végzett műveletek során. A számítógép létrehozta a rádiókapcsolatot az üstökös mag körül keringő „anyaszondával” a tudományos adatok továbbítására, és a földi parancsok fogadására. Gyűjtötte, majd továbbította az alrendszerek működése során keletkező, és a tudományos műszerek által mért adatokat. A felsorolt létfontosságú

feladatok megoldása hibatoleráns architektúra alkalmazását igényelte. A legfőbb tervezési szempont az volt, hogy a fedélzeti számítógépnek a funkcionális alrendszerek meghibásodásának bármely kombinációja esetén is funkcióvesztés nélkül kellett ellátnia feladatait. Mivel a küldetés során nem volt lehetőség gyors és közvetlen földi beavatkozásra a jelentős jelterjedési idő miatt, a számítógépnek autonóm módon fel kellett ismernie, ha egy egység hibásan működött, és ki kellett azt iktatnia, egyben aktiválva a megfelelő tartalék rendszert. A központi számítógép folyamatos rendelkezésre állását a meleg tartalékolt hibatoleráns architektúra biztosította.

Az adatfeldolgozó egység (DPU, Data Processing Unit) megvalósításához a kis fogyasztású, űrminősítésű és sugárzásálló Harris RTX2010 processzort választottuk (8. ábra). Ez a 16 bites processzor Forth programozási nyelvre optimalizált struktúrájú, a Forth utasítások végrehajtását hardveresen támogatja, ez biztosítja gyors működését. A Forth ma már feledésbe merült verem- (stack) orientált programozási nyelv. A CDMS feladatainak ütemezésére, párhuzamos futtatására saját fejlesztésű, valós idejű, pre-emptív, többfeladatos operációs rendszerre volt szükség (9. ábra). A processzor aktuális programja RAM memóriában futott, a megfelelő kódok PROM vagy EEPROM memóriából hibátlanági ellenőrzés után töltődtek át. A működtető program tömörítve négyszeresen (fő és tartalék DPU-ban) került tárolásra az újírható memóriában (EEPROM), az indítást és öntesztelést végző program csak olvasható memóriából (PROM) fut és az elsőnek talált hibátlan működtető programot a RAM memóriából futtatja. Az EEPROM és RAM memóriák Hamming-kódolású hibavédelemmel voltak ellátva. Mind az EEPROM memóriában, mind a RAM memóriában esetleges programjavító kódreszeket is tárolni lehetett.

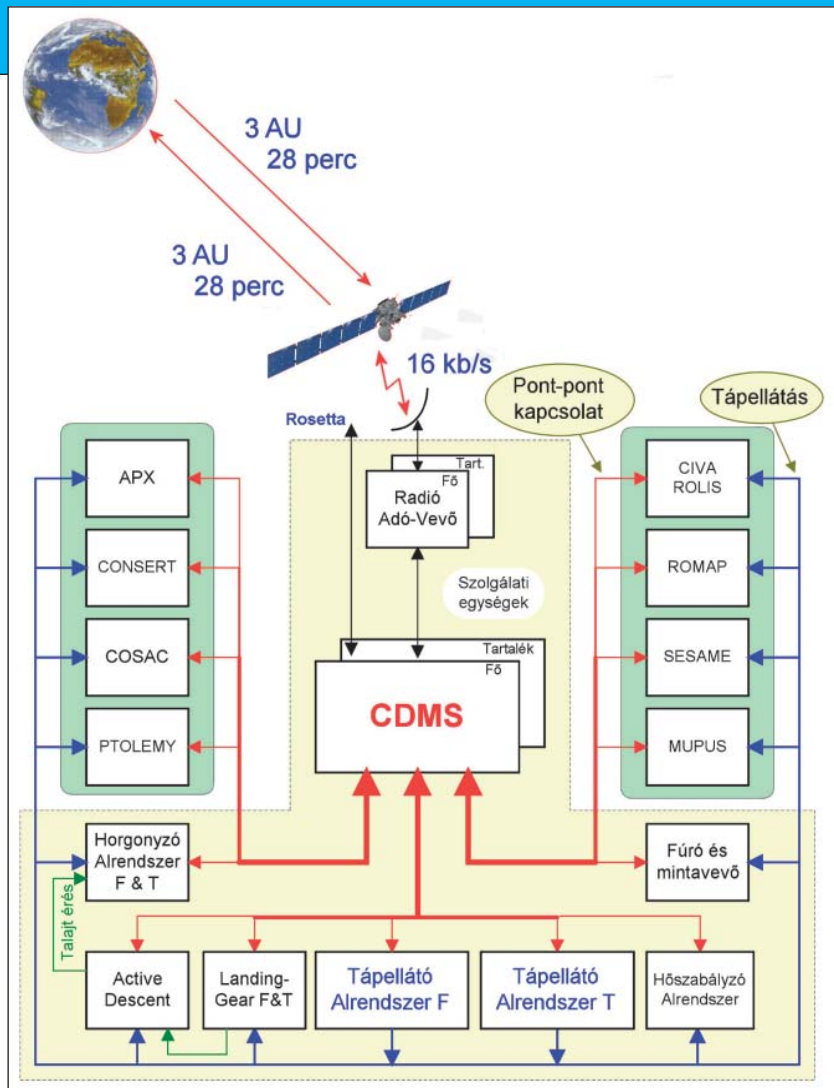
A földi parancsok számának csökkentése érdekében a leszállóegység műveleteinek irányítása statikus és dinamikus működést leíró paramétertáblák segítségével történt. A táblázatokat még a leszállás előtt fel lehetett tölteni és a körülmények pontosabb ismerete alapján csak a megfelelő működtető szekvenciát kellett földi parancssal elindítani. A Philae energiakorlátai miatt a Rosetta „anyaszonda” közvetítésével kapta meg a földi parancsokat és továbbította a mérési adatokat. Mivel az üstökös magja forgott a rajta lévő Philae-vel és körülötte keringett a Rosetta, ezért a rádiókapcsolat lehetőségét autonóm módon kellett felismerni. A megbízhatóság érdekében kis integráltságú elemekből készült a kapcsolat lehetőségét periodikusan kereső áramkör. A szoftver megbízhatóságát növelte, hogy valósidejű, sokfeladatos operációs rendszer készült, amelyben egymástól jól elkülönítve futnak a kísérleteket kezelő feladatok. Nem várt hibás állapotok Földről való kezelésére kis integráltságú áramkörökből nagy megbízhatóságú vész-parancsdekódoló lett beépítve. Minden egyes műszer mérési adatai átmeneti tárolásra kerültek, és azokat csak az azt követő rádiókapcsolatban továbbította a CDMS. A bonyolult szoftver módosításainak feltöltés előtti ellenőrzésére a számítógép teljes környezetét szoftveresen szimuláltuk, ami lehetővé tette a gyors, mindenre kiterjedő tesztelését. A három példányban elkészített rendszer öt számítógépet és nyolc beágyazott processzort tartalmazott (10. és 11. ábra).

A CDMS-ből a fejlesztés során alapvetően két változat készült, mindegyik több példányban (12. ábra). Két laboratóriumi példány, két elektromos modell, minősítő példány, repülő példány, tartalék példány és földi referenciamodell. Ezek részben a hardver véglegesítése céljából készültek, részben a szoftverfejlesztést, valamint a minőségellenőrzés bevizsgálását szolgálták. Különböző felépítették a Philae földi referenciamodelljét. A megbízhatóság bizonyítására többlépcsős környezeti hatástanulmányokat dolgoztak ki (vibrációs és hő-vákuum): kártya, CDMS, Philae és Rosetta szinten (13. és 14. ábra).

A leszállás során a talajérés érzékelés jele hatására a CDMS először a fő

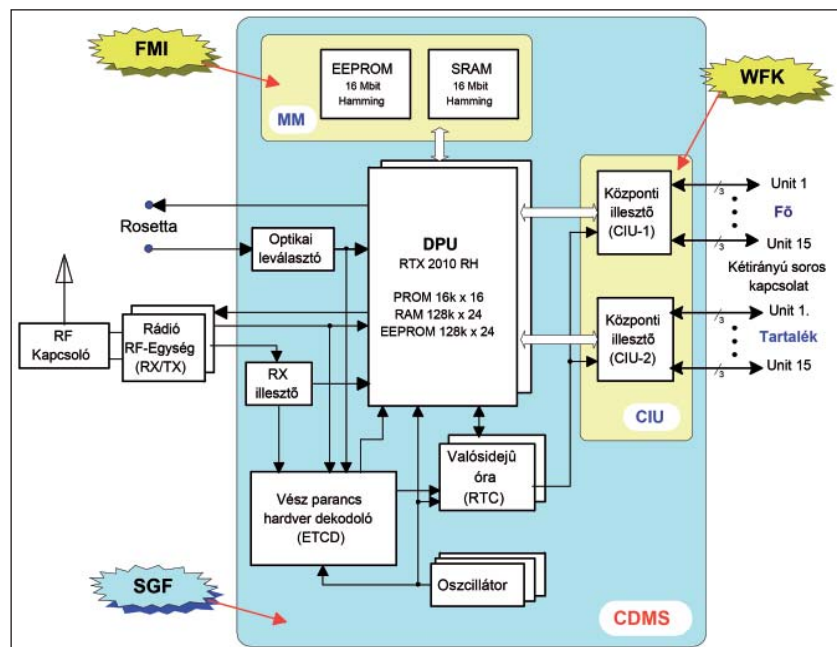
8. ábra. DPU funkcionális blokkvázlata

FMI – Finnish Meteorological Institute, WFK – Wigner Fizikai Kutatóközpont, MM – Mass Memory, SRAM – Static Random Access Memory, DPU – Digital Processor Unit, RTC – Real-Time Clock, RX – Rádió adó-vevő, ETCD – Emergency TeleCommand Decoder, CIU – Central Interface Unit (Forrás: a szerző)

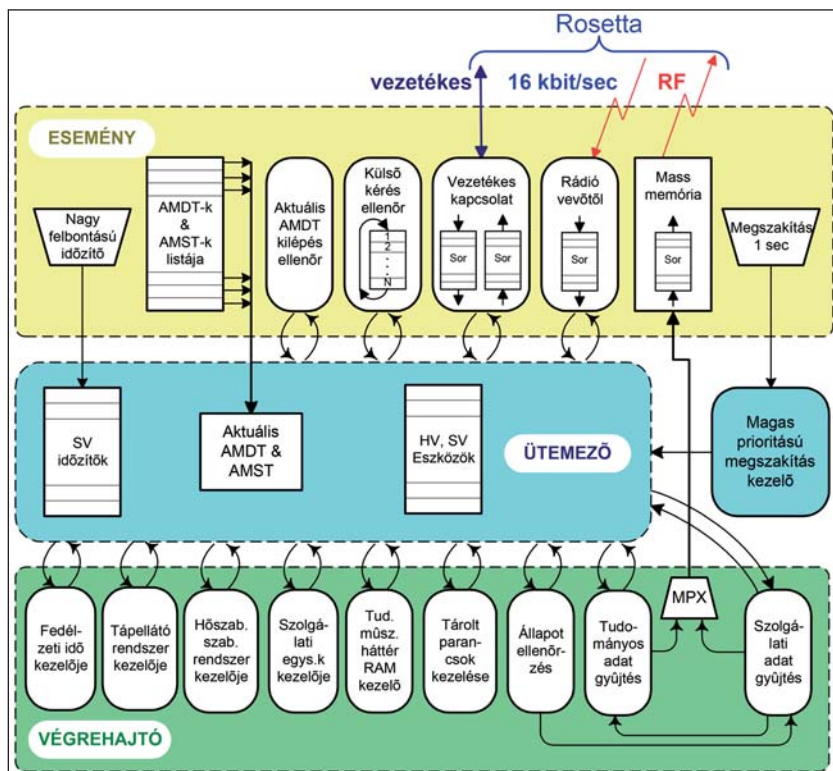
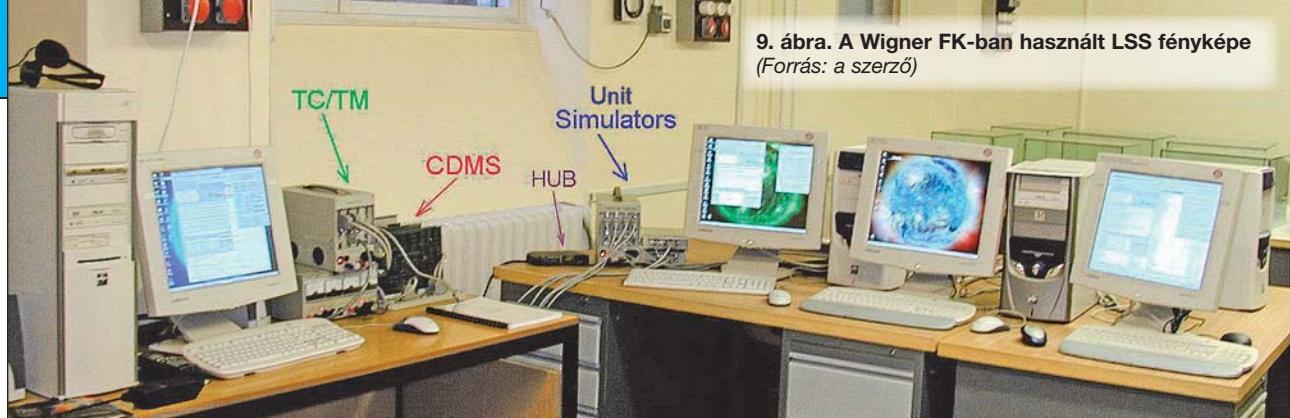


7. ábra. A Philae egységeinek blokkvázlata

APXS – Alfa Proton Röntgen Spektrométer; CIVA – Panoráma képfelvévő; ROLIS – Mikroszkopikus képfelvévő; CONSERT – Üstökös magot átvilágító rádiórendszer; COSAC – Mintavevő és mintaelemző rendszer; PTOLEMY – Gázösszetétel analízátor; MUPUS – Többfunkciós műszer a felszín alatti vizsgálatra; ROMAP – Mágneses tér és plazma analízátor; SD2 – Fúró, mintavevő és szétosztó rendszer; SESAME – Akusztikus talajszerkezet vizsgáló, porelemző, AU-csillagászati egység (Forrás: a szerző)



9. ábra. A Wigner FK-ban használt LSS fényképe (Forrás: a szerző)

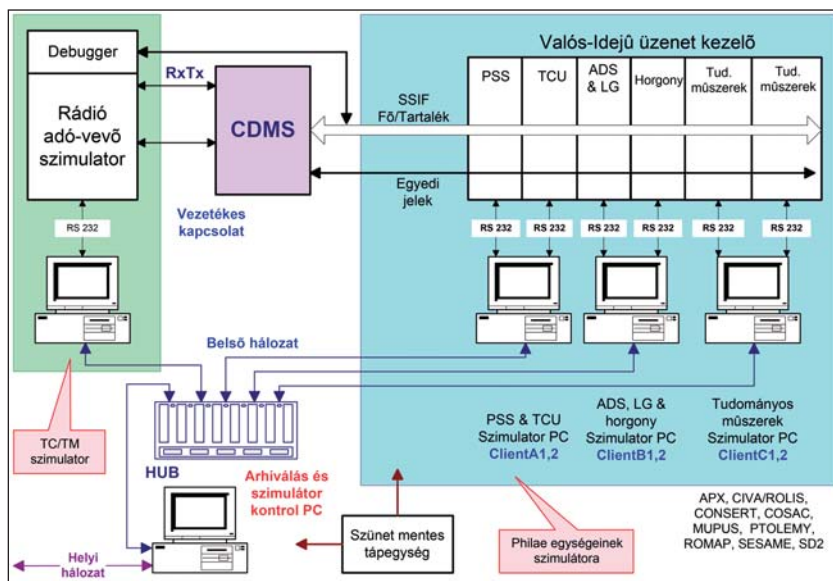


10. ábra. A CDMS szoftver egyszerűsített blokkvázlata (Forrás: a szerző)

horgonyt, ha az nem működött, akkor a tartalékot indította volna, és ezekkel egy időben a Philae tetején lévő leszorító fűvókát működtette volna a visszapattnás megakadályozására. A CDMS Földre küldött szolgálati adataiban ezen vezérlőjelek kiadása ellenőrizhető volt, de sem a lehorgonyzás (fő és tartalék) sem a leszorító fűvókák nem működtek. Ennek következtében a Philae a kiválasztott leszállóhelytől két elpattanás után 1 km-es távolságban, egy sziklafal tövében, árnyékos helyen megdőlve (30°) állt meg. Az elem és az akkumulátorok lemerüléséig, 60 órán át működött.

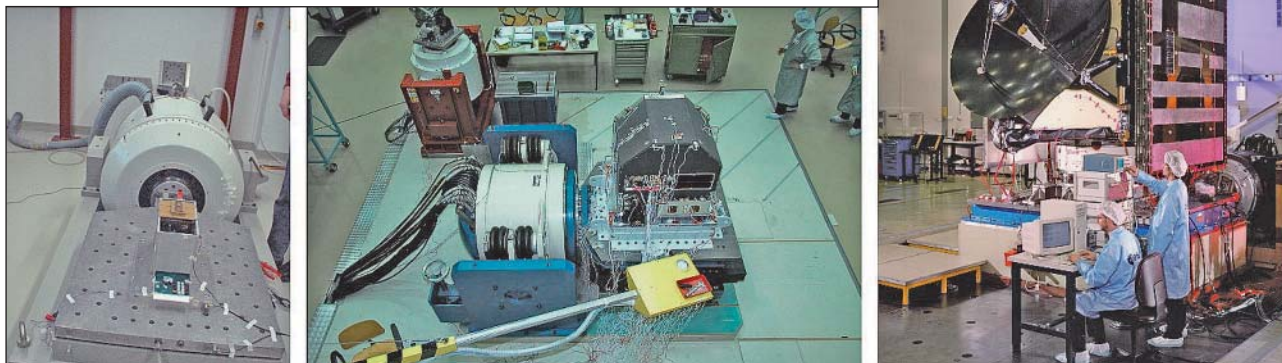
ÖSSZEGZÉS

A technikai fejlődés lehetővé tette, hogy a Rosetta-Philae program keretében lényegesen több és nagyobb pontosságú mérést lehessen elvégezni, mint a VEGA esetében. A nagy-megbízhatóságú FPGA-k megjelenése jelentős méret- és tömegcsökkenést hozott. A nagyobb számítási teljesítményű processzorok és a nagyobb memóriák jelentősen megnövelték az autonóm működés és hibafelismerés lehetőségeit. Amíg a VEGA programban a tévérendszerben a két processzort tartalmazó közös elektronikai egység tömege elérte a 12 kg-ot, a lényegesen többet tudó (nagyobb számítási teljesítményű) szintén két processzort tartalmazó hibatoleráns Philae központi számítógép tömege a 2 kg-ot sem érte el. A VEGA program tévés követőrendszerében az időben felismert hiba esetén a tartalék rendszerre való átkapcsolás csak földi parancsral történhetett. A Philae központi számítógépében a hibafelismerő áramkör autonóm módon tudott a tartalék rendszerre átkapcsolni. A VEGA esetében a szűkös memóriakapacitás miatt saját magunknak kellett valós idejű operációs rendszert fejleszteni, míg a Philae CDMS szoftveréhez a Forth programozási környezet tette szükségessé ugyanezt. A magyar mérnökök mindkét programban megbízható programkritikus rendszert fejlesztek, és ez a jövőre nézve kiváló referenciát jelent. E sikeres munkák eredményezték, hogy a Berni Egyetem az ExoMars



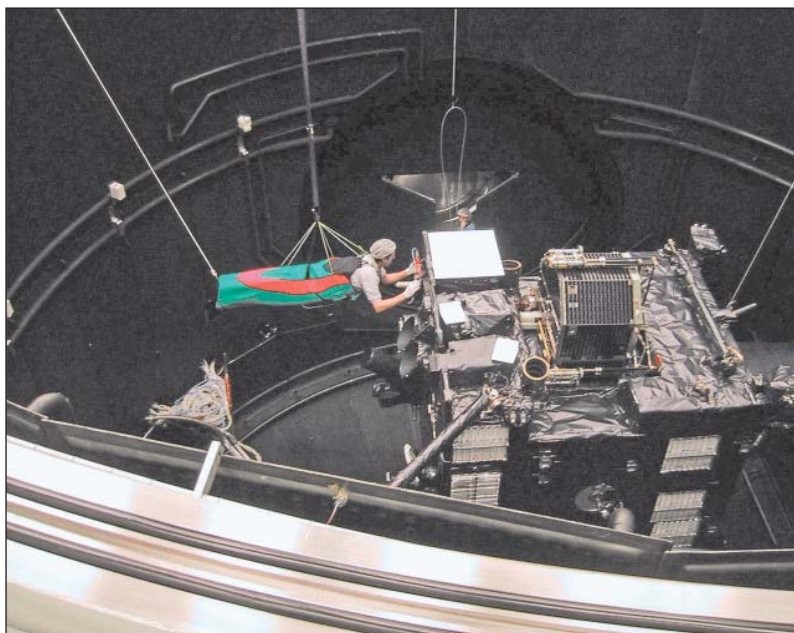
11. ábra. A Philae leszállóegység szoftveres szimulátor (LSS) logikai blokkvázlata
 RxTx – Rádió vevő és adó; SSIF – SubSystem Interface; PSS – Power SubSystem;
 TCU – Thermal Control Unit; ADS – Active Descent System; LG – Landing Gear;
 TC/TM – TeleCommand Telemetry (Forrás: a szerző)

12. ábra. Vibrációs vizsgálatok; balról jobbra: kártya és CDMS, Philae, Rosetta-Philae szinten [Forrás: a szerző (kártya és CDMS) és az ESA (Philae illetve Rosetta-Philae)]



13. ábra. A CDMS különböző változatai

Balról jobbra: laboratóriumi modell (két példány), elektromos modell, szoftverfejlesztői modell, végleges változat (minősítő, repülő, tartalék, földi referencia példány) [Forrás: a szerző]



14. ábra. Rosetta-Philae űrszonda páros a hő-vákuumkamrában [Forrás: ESA]

program színes sztereó kamerájának szoftverfejlesztését egy évvel az indítás előtt a svájci szoftverfejlesztők helyett az SGF Kft.-re bízta.

IRODALOM

- R. Z. Sagdeev, F. Szabó, G. A. Avanesov, P. Cruvellier, L. Szabó, K. Szegő, A. Abergel, A. Balázs, I. V. Barinov, J. L. Bertoux, J. Blamont, M. Detaille, E. Demarelis, G. N. Dulnev, G. Endrőczy, M. Gárdos, M. Kanyó, V. I. Kostenko, V. A. Krasikov, T. Nguyen-Trong, Z. Nyitrai, I. Rényi, P. Rusznyák, V. A. Shamis, B. Smith, K. G. Sukhanov, S. Szalai, V. I. Tarnapolsky, I. Tóth, G. Tsukanova, B. I. Valnicek, L. Várhalmi, Yu.K. Zaiko, S. I. Zatsepin, Ya.L. Ziman, M. Zsenei, B. S. Zhukov: Television observation of comet Halley from VEGA spacecraft, *Nature* Vol. 321, 15 May 1986, p. 262-266.;
- Balázs A., Bangó Gy., Gárdos M., Hamza E., Kanyó M., Kovács G., Nyitrai Z., Redl R., Rusznyák P., Szabó L., Szalai S., Szűcs K., Szabó B.: Televíziós rendszer a VEGA kísérlethez. *Mérés és Automatika*, 33. évf., 1985. 1-2. szám, 9-12. old.
- S. Szalai: The Imaging System on board the VEGA Spacecraft, *Images of the Nucleus of Comet Halley*, ESA SP-1127, 1996, Vol. 2, p. 20-32.;
- Attila Baksa, András Balázs, Zoltán Pálos, Sándor Szalai, László Várhalmi: Embedded Computer System on the Rosetta Lander, *DASIA 2003 Data Systems In Aerospace*, SP-532, p.250-256, Prague, 2-6 June 2003;
- Szalai Sándor, Balázs András: A Rosetta Lander központi vezérlő és adatgyűjtő számítógépe, *Híradástechnika*, 2004. május, 34-36 oldal;
- S. Szalai, A. Balázs, A. Baksa, G. Tróznai: Rosetta Lander Software Simulator, 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 2006 (on DVD of 57 IAC);
- A. Balázs, A. Baksa, H. Bitterlich, I. Hernyes, O. Küchemann, Z. Pálos, J. Rustenbach, W. Schmidt, P. Spányi, J. Sulyán, S. Szalai, and L. Várhalmi: The Central on-Board Computer of the Philae Lander in the Context of the Rosetta Space Mission; *Reliable Software Technologies - Ada-Europe 2015*, p. 18-32.

(Fotók a szerző gyűjteményéből.)