

Reizinger Patrik,¹ Huszár Péter,² Milánkovich Dorottya,³
Széll Alexandra⁴

Kisműholdak fejlesztése a sokoldalúság és a könnyű reprodukálhatóság tükrében

A világűr mára már nem csak a gazdasági nagyhatalmak kiváltsága. A társuló technológia fejlődésének hatására bekövetkező költségcsökkenés eredményeképpen napjainkban akár egy kis cég, alacsony költségvetéssel is megmérettetheti magát a 21. század űrversenyében. Ehhez biztosítanak tökéletes platformot a nano- és mikroműholdak, amelyek alkalmazási lehetőségei folyamatosan bővülnek. Az egyre változatosabb hasznos terhek azonban értéktelenek a sokoldalú platformok és azok alapvető alrendszerei nélkül, mint például a fedélzeti számítógép, tápegység, kommunikációs egység vagy a műhold térbeli orientációjáért felelős alrendszer (Attitude Determination and Control System – ADCS). Így felmerül az igény egy olyan univerzális műholdplatform fejlesztésére, amelyben a létfontosságú alrendszerek biztosítva vannak különböző, harmadik fél által fejlesztett hasznos terhek, illetve tudományos kísérleti eszközök számára. Ezzel létrehozhatunk egy standardizált, költséghatékony és rugalmasan bővíthető, ezáltal még szélesebb körben elérhető kisműholdas platformot. A cikkben részletesen bemutatunk egy, a fentiekben leírt követelményeknek megfelelő univerzális CubeSat-platformot, kitérünk az egyedi mérnöki módszereket és megoldásokat igénylő fejlesztési folyamatokra, a nagy megbízhatóságú szoftvertechnológia előnyeire és a platform nyújtotta új lehetőségekre.

Kulcsszavak: CubeSat, kisműhold, műholdfejlesztés, univerzális műholdplatform, ADCS

Cubesat Development from the Perspective of Versatility and Easy Reproducibility

Space is not a privilege of the greatest economic powers anymore. As a result of constantly decreasing costs and technological advancements, even small companies with small budgets can

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Irányítástechnika és Informatika Tanszék, Fejlesztőmérnök, Villamosmérnök MSc, C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., e-mail: patrik.reizinger@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9861-0293>

² C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., beágyazott hardver-/szoftverfejlesztő, e-mail: peter.huszar@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6169-3777>

³ C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., projektmenedzser, e-mail: dorottya.milankovich@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8127-0242>

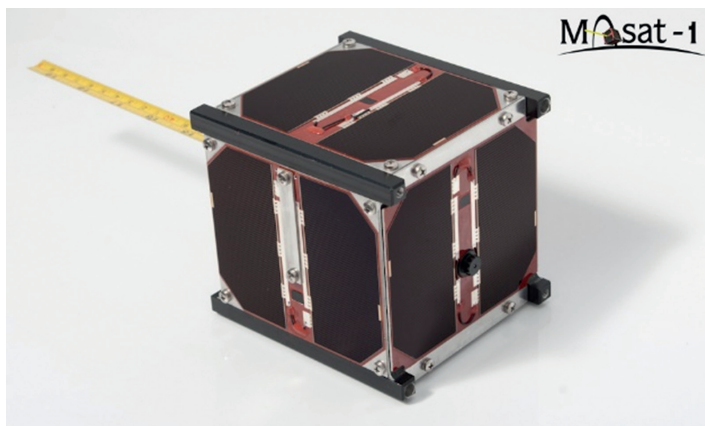
⁴ C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., üzletfejlesztési vezető, e-mail: alexandra.szell@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5312-0394>

take part in the Space Race of 21st century. Small and microsatellites are the perfect platforms for this and their use cases are constantly expanding. However, the more and more diverse payloads are worthless without the fundamental subsystems such as the onboard computer, power supplies, wireless communication unit or the subsystem which is responsible for the orientation of the satellite. Therefore, a need arises for the development of a universal satellite platform that provides the essentials for different payloads and scientific research equipment designed by third parties. Thus, for creating a standardised, cost-effective and flexibly expandable, therefore more accessible small satellite platform. The authors describe a universal CubeSat platform that meets the above requirements, elaborating in detail the challenging development process which demands unique solutions, the advantages of highly reliable software technologies and the potential provided by such a platform.

Keywords: CubeSat, small satellite, satellite development, universal satellite platform, ADCS

1. Kisműholdak

A világűr széles körű felhasználási lehetőségeinek kiaknázásához nagymértékben hozzájárult az úgynevezett CubeSat szabvány,⁵ amelynek megjelenése óta már 1000 fölötti CubeSat állt földközeli (Low Earth Orbit – LEO) pályára, 500 km körüli magasságban. A műholdak felszereltségéről, a küldetést koordináló szervezetről, valamint a felhasználás céljáról is a részletekig kiterjedő adatbázisok állnak rendelkezésre.⁶ Hazánk esetében az első, CubeSat szabványnak megfelelő műhold az 1 U-s (unit, azaz egy 10 cm élhosszúságú kocka méretével megegyező) Masat-1⁷ volt.



1. ábra

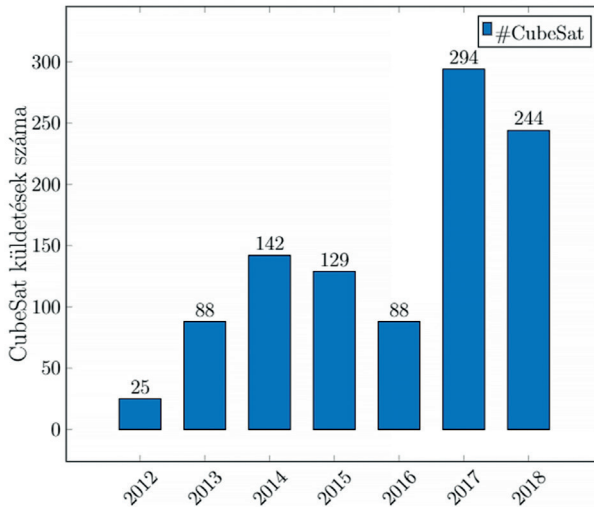
Masat-1, az első magyar CubeSat. Forrás: Dudás-Pápay–Seller (2014) i. m. 1.

⁵ *CubeSat Design Specification*. Revision 12, California Polytechnic.

⁶ Michael Swartwout: *CubeSat Database*.; Erik Kulu: *Nanosatellite & CubeSat Database*.; Jasper Bouwmeester – Jian Guo: Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 67. (2010), 7–8. 854–862.

⁷ Dudás Levente – Pápay Levente – Seller Rudolf: Automated and remote controlled ground station of Masat-1, the first Hungarian satellite. In *24th International Conference Radioelektronika*. 2014. 1–4.

Ahogy azt a 2. ábra is mutatja, a CubeSat-ok piaci szegmense jelentős bővülést mutat. A Masat-1 felbocsátásának évében, 2012-ben mindösszesen 25 CubeSat állt pályára, míg 2018-ban ez a szám már 244 volt. Ennek oka elsősorban az, hogy a kezdeti, demonstrációs (In-Orbit Demonstration – IOD) célú kísérleteket fokozatosan – az iparági tudásbázis kialakulásával egyidejűleg – felváltották a jóval magasabb követelményeket támaztó missziók, beleértve tudományos kísérleteket, valamint ipari felhasználást (például telekommunikáció, távérzékelés) is.



2. ábra

CubeSat-küldetések száma (2012–2018). Forrás: Kulu (é. n.) i. m.

A komplex küldetések követelményeinek megbízható teljesítése számos mérnöki kihívást jelent, kiváltképp, amennyiben a fent említett szabvány által meghatározott, tömegre, térfogatra, energiafogyasztásra, valamint ezáltal számítási kapacitásra is vonatkozó szigorú korlátozásokat is figyelembe vesszük. Ezek alapján belátható, hogy egy, a korlátok betartása mellett is bizonyos fokú rugalmasságot, konfigurálhatóságot biztosító CubeSat-platform jelentős mértékben képes hozzájárulni a világűr rejtette lehetőségek kiaknázásához. Így ugyanis adott misszió esetében jelentős mértékben csökkenthető az idő és ezáltal a pénzügyi ráfordítás a világűr eléréséhez. Ezen irányelveket követve, a Masat-1⁸ szakmai hagyatékára alapozva, a C3S Elektronikai Fejlesztő Kft. az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) égisze alatt egy sorozatgyártható CubeSat-platform fejlesztésén dolgozik.

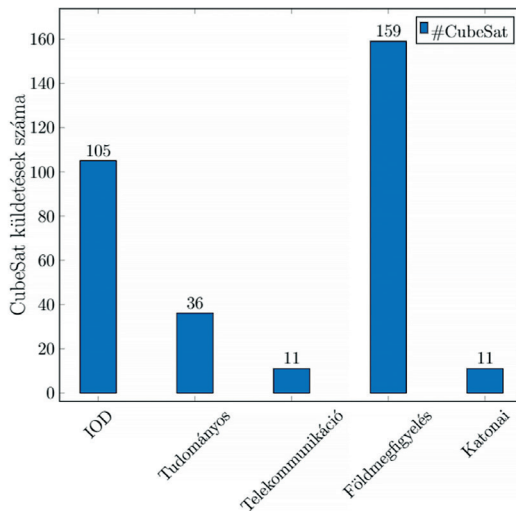
Az alábbiakban egy, a CubeSat szabványnak megfelelő általános műholdplatformot ismertetünk, külön kitérve az egyes alrendszerekre, a fejlesztés során felmerülő mérnöki kihívásokra, valamint nem megfelelően a sikeres misszióhoz elengedhetetlen támogató rendszerek, mint a földi állomás vagy a MOC/SOC (műveleti/tudományos operatív központ, Mission/Scientific Operation Center), ismertetéséről sem. Ennek érdekében, hogy a felmerülő

⁸ Dudás–Pápay–Seller (2014) i. m.

kérdéseket azok kontextusába helyezve vizsgálhassuk meg, először mindenképpen érdemes röviden áttekinteni a CubeSat-okra szabott küldetéstípusokat.

1.1. Küldetések

Az egyik legfontosabb előnye a CubeSat-műholdaknak azok űripari mértékkel nézve alacsony költsége, ami alkalmassá teszi őket többek között arra, hogy több műholdból álló konstellációk kötelékében minden eddiginél nagyobb lefedettséget érhesen el az emberiség a világűrben. Legyen szó űridőjárás-monitorozásról (amilyen a magyar kutatók által tervezett, a közeljövőben megvalósítandó CROSS rendszer) vagy földi időjárás, tengerhajózás és repülőgép-forgalom monitorozásáról (például Lemur/Spire) vagy földmegfigyelésről (például Flock és Dove/Planet), mint ahogy azt az elkészített kimutatás (3. ábra) is mutatja. Az egyik legfontosabb alkalmazási területet egyértelműen a különböző távérzékelési feladatok alkotják. Találunk számos, a látható fény tartományában működő képalkotó berendezés mellett speciális igényeket kielégítő megoldásokat is, legyen szó közeli infra-, röntgen- vagy gamma-tartományról – mindezt a CubeSatok által képviselt kompakt méretben.⁹



3. ábra

*CubeSat-küldetések megoszlása típus alapján (2016-ig bezárólag). Forrás: Josep Virgili-Llop – Polat Halis – Romano Marcello: Survey, Statistical Analysis and Classification of Launched CubeSat Missions with Emphasis on the Attitude Control Method. *Journal of Small Satellites*, 5. (2016), 3. 513–530.*

A CubeSat-küldetések széles felhasználási lehetőségei mellett a szabvány elterjedésének másik fő mozgatórugója a jól skálázható, az elmúlt években egyre versenyképesebb technológiai megoldások jelenléte. Abból kifolyólag, mivel CubeSat-ok esetében a szemlélet teljesen eltér a nagyobb műholdak esetében tapasztalt egy műhold – egy misszió megközelítéstől, a kialakított

⁹ Kulu (é. n.) i. m.

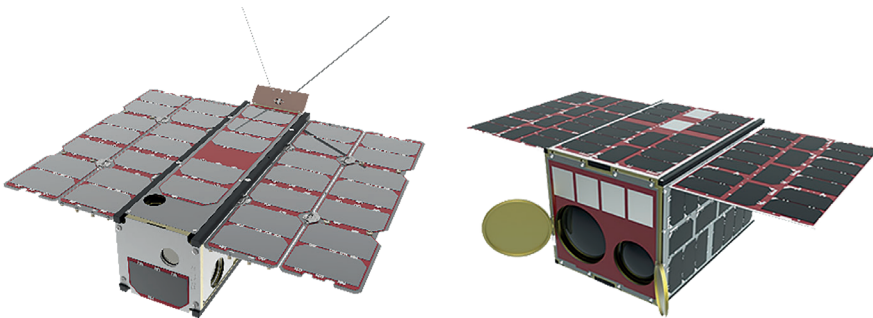
rendszerek számos szituációban alkalmazhatóak teljes újratervezés nélkül. A szabványos megoldások jelentős költség- és időmegtakarítást jelentenek, így mind a hasznos teher (payload), mind pedig – az akár különböző beszállítótól származó – alrendszerek akár negyedéves, féléves távlatban integrálhatók.

A szabványos megoldásokból kifolyólag a hordozórakétában elhelyezett POD-ok is nagyobb szériában gyárthatók, így akár a korábbiakhoz képest két nagyságrenddel több, akár száz¹⁰ CubeSat is pályára állítható egyetlen felbocsátás alkalmával. Ezenfelül a megnövekedett küldetések a rakétastartok gyakoribb ütemezését követelték meg, ami adott küldetés szempontjából jobb tervezhetőséget, gyorsabb megtérülést jelent.

A műholdhoz kapcsolódó infrastruktúra esetében szintén számos olyan szolgáltatás érhető el, ami szabványos kialakításából kifolyólag jelentősen képes a küldetés implementációs idejét lerövidíteni. Példaként említhető akár a tudományos, akár a műveleti operatív központ vezérlőszoftvere, amelyet így nem szükséges minden küldetés esetén az alapoktól kezdve implementálni, elegendő az egyes funkciók személyre szabása. Ugyanakkor a műholddal kapcsolatot létesítő földiállomás-hálózat is igénybe vehető szolgáltatási alapon, így pedig költséghatékonyan megnövelhető a műhold és a földi operátor között létesített hasznos kommunikációs időtartam.

A széles körű feladatoknak megfelelően kezdetekben a főként 1, illetve 3 U-ra korlátozódó méretek mellett egyre nagyobb létjogosultságot szereznek a nagyobb, akár 6, 12 vagy 16 U-os CubeSatok. Ebben a méretben ugyanis már van lehetőség arra, hogy a platform kialakítása kielégítse a komplexebb missziók által támasztott követelményeket (például a nagyobb energiatárolási kapacitás nagyobb számítási kapacitást képes biztosítani a megnövekedett fogyasztás fedezésével), valamint hogy nagyobb méretű hasznos terheket juttathassunk földközeli pályára.

Az elmúlt évek tendenciái tehát a megvalósítható küldetések körének szélesítése mellett jelentős költségcsökkenést eredményeztek nagyobb megbízhatóság mellett, így pedig tovább növelték a kisműholdak iránti érdeklődést a CubeSat-küldetések gazdaságosságának növelése által. A csökkenő költségszint következményeként számos iparág számára a műhold alapú megoldások egyre inkább valós alternatívát jelentenek a földfelszíni megoldásokhoz képest.



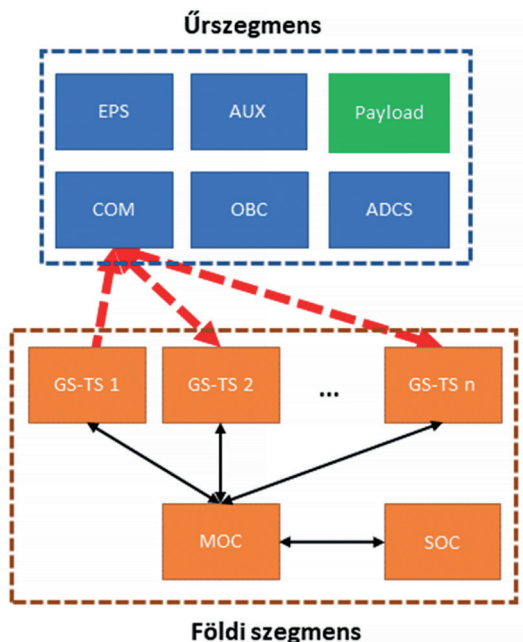
4. ábra

Egy 3U-os (bal) és egy 12U-os (jobb) CubeSat-platform strukturális terve. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

¹⁰ Uo.

2. Univerzális műholdplatform

A kifejlesztett műholdplatform esetében a fő hangsúly a moduláris kialakításon volt, amelyet az 5. ábra szemléltet. A platform alapvetően két szegmensre, a földi és az űrszegmensre bontható, amelyek közül jelen munka elsősorban utóbbira fókuszál.



5. ábra

A kifejlesztett CubeSat-platform földi és űrszegmense. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

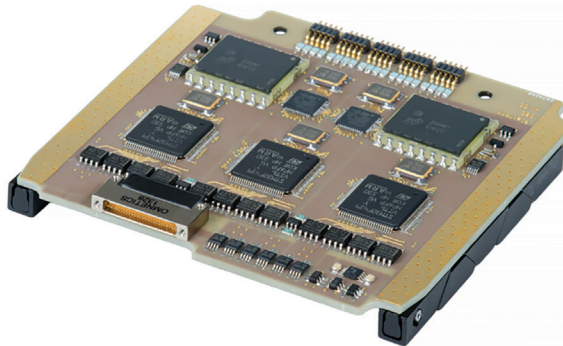
A földi szegmens legfontosabb feladata a műhoddal való kommunikáció, valamint a küldetéssel kapcsolatos operatív és tudományos adatok kezelése. Ehhez a kommunikációs kapcsolatot a földi állomások (GS, Ground Station) létesítik a két szegmens között, míg az adatok és kommunikációs üzenetek menedzselése elsődlegesen a Műveletirányítási Központ (MOC, Mission Operation Centre) feladata, a Tudományos Műveleti Központ (SOC, Scientific Operation Centre) pedig tudományos szempontból lényeges információkhoz fér hozzá.

A következőkben részletesen bemutatandó űrszegmens komponensei magukban foglalják az energiaellátás biztosítását, a kommunikációt, a műhold orientációjának meghatározását és szabályzását, valamint természetesen a platform vezérlését és a hasznos terhet is.

2.1. Fedélzeti számítógép (On-Board Computer, OBC)

A műhold működéséért felelős magas szintű autonómiák nagy részét az OBC-ben implementálták. Csak a kifejezetten alrendszer-specifikus algoritmusok kerültek át más alrendszerek

hatáskörébe. Az OBC első és egyik legfontosabb feladata a felbocsátást követően a műhold indításának levezénylése. A hordozórakétán található POD (Picosatellite Orbital Deployer) sikeres elhagyásától számított 30 perc elteltével a fedélzeti számítógép elkezd végrehajtani a műhold indítási szekvenciáját. Meghatározott sorrendben kiadja a parancsot a napelemszárnyak és az antennák nyitására, és feléleszti a többi alrendszert. Az indulási szekvencia lezárásaképpen bekapcsolja a kommunikációs alrendszert, és elküldi első üzeneteit a Föld felé. A sikeres indulást követően az OBC feladata többek között az egyes redundáns alrendszerek és fedélzeti kommunikációs buszok közötti váltás szükség szerinti lebonyolítása. Tárolja és kezeli a fedélzeti időt, elvégzi annak földi időhöz történő szinkronizációját. Ellátja a műhold és a földi szegmens közötti kommunikációhoz kapcsolódó magas szintű feladatokat. A beérkező üzeneteket dekódolja és eljuttatja a címzett számára további feldolgozásra.



6. ábra

A kifejlesztett CubeSat-platform fedélzeti számítógépe. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Az OBC-n kaptak helyet a redundáns kialakítású memóriák is, így a mérési adatok, rendszerműködés során keletkező naplófájlok tárolását, tömörítését, valamint fel- és letöltését is a fedélzeti számítógép végzi. Továbbá az OBC lehetővé teszi a műhold alrendszereinek működés közbeni szoftverfrissítését és a különböző feltételekhez kötött késleltetett parancsvégrehajtást. Áramkörü szempontból két teljesen redundáns részből áll, ezzel is biztosítva a nagy megbízhatóságot és a magas rendelkezésre állást. Megtalálható rajta egy kitüntetett szerepű, vezetékes kommunikációs port is, az úgynevezett access port. Ezen keresztül, még a Földi integráció során és akár az orrkúpba integrálás előtt hozzá lehet férni az összes alrendszerhez tesztelés, diagnosztizálás és szoftverfrissítés céljából.

2.2. Kommunikációs alrendszer (Communication Subsystem, COM)

A kommunikációért felelős alrendszer szerepe kiemelten fontos egy műholdküldetés tekintetében. Nélküle nincs lehetőség arra, hogy a mérési eredményekhez, naplófájlokhoz (általánosságban telemetria) hozzáférjen a földi operátor. Ezenfelül interfészt biztosít a műhold funkcióinak vezérléséhez (telecommand) is. A COM alrendszer magas szintű vezérlését az OBC végzi. A kommunikációs modul pedig a kommunikáció lebonyolításához szükséges hardverközeli

feladatok végrehajtásáért és az időszinkronizációért felelős, magas szintű autonómiával viszont nem rendelkezik.

Vétel során a COM feladata az LNA (Low Noise Amplifier, kis zajú műveleti erősítő) bekapcsolása, míg adás esetén az úgynevezett RF frontend kezelése. A jelentős hőmérsékleti ingadozás hatása az akkumulátorcellák mellett a rádióadó tervezése során is különös figyelmet igényelt. A vivőfrekvencia a hőmérséklet függvényében változik, így a szolgáltatás megfelelő minőségének biztosítása érdekében kompenzációra van szükség. A probléma kezelése hőkamrás identifikációt követően, a mérési eredményekből kialakított LUT (Lookup Table) segítségével valósult meg. Ugyanígy hőmérséklet-kompenzált a teljesítményerősítő is – ebben az esetben ráadásul nagyobb pontosságú hőmérsékletmérést hajt végre a műhold – a vivőfrekvencia hibájának minimalizálása érdekében.



7. ábra

A kifejlesztett CubeSat-platform COM alrendszere. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A COM-modul több speciális megoldást alkalmaz a kommunikációs protokoll kialakítása során is. A telemetria kiemelt üzenettípusa az úgynevezett beaconüzenet. Ezt az OBC állítja össze a legfontosabb telemetriai jellemzőkből (beleértve az adási és vételi ciklusok közötti váltás jelzését is), amelyet az adási ciklus végén továbbít a földi operátornak. Annak érdekében, hogy sikertelen antennanyitás esetén is lehetőség legyen a földi állomással való kommunikációra, a COM alrendszer az úgynevezett Barker 13 kódolást alkalmazza, amely minden bitet 13 biten kódolva teszi lehetővé, hogy kis teljesítménnyel is működőképes legyen az adatátvitel. A robusztusságot szolgálja az a tény is, hogy az OBC-hez hasonlóan a COM is teljesen redundáns. A platformban az alrendszer két példánya kapott helyet, így az egyik meghibásodása esetén biztosított a megfelelő működés.

2.3. Tápellátásért felelős alrendszer (Electric Power System, EPS)

Az EPS feladata a műhold teljes tápellátásának biztosítása, amelynek maradéktalan és robusztus kielégítése érdekében számos áramkörti elem összehangolt működésére van szükség. Ezek közé tartozik egyrészt maga az akkumulátor, amelynek a napelemcellákból származó bejövő energia és a műhold energiaigényének időbeli különbségéből származó eltérés kompenzálása a célja.

Kiváltképp kritikus ez a pálya árnyékban lévő szakaszán, ahol lényegében csak az akkumulátor szolgáltatja a platform működéséhez szükséges energiát.

A hatékonyság biztosítása érdekében az alrendszer rendelkezik egy úgynevezett MPPT (Maximum Power Point Tracker, maximális teljesítmény követő) modullal, amely a napelemekből származó energiát maximalizálja a munkapont megfelelő beállításával. A megfelelő működés érdekében az akkumulátort kiegészíti többek között egy töltésvezérlő, számos – az egyes rendszerkomponensek áram- és feszültségigényéhez alkalmazkodó – DC-DC konverter, valamint a túláram-, illetve túlfeszültségvédelmet ellátó komponensek is. Az akkumulátorcellák élettartamának növelése érdekében integráltak egy fűtőáramkört a jelentős hőmérsékletingadozás hatásának mérséklésére.

2.4. Segédelektronika (*Auxiliary Electronics, AUX*)

A segédelektronikát tartalmazó alrendszer két fő feladattal rendelkezik, amelyek egyrészt rendszertechnikailag, másrészt pedig a küldetés sikeres végrehajtását tekintve elengedhetetlenek. Egyrészt az AUX tartalmazza az úgynevezett backplane-t, ami a buszrendszert, valamint a szükséges csatlakozókat magában foglalva biztosítja az összeköttetést az egyes alrendszerek között. Másrészt pedig a misszió életciklusának elején tölt be a segédelektronikai alrendszer fontos feladatot, mégpedig a napelemszárnyak és antenna (amelyek a POD-ban összecukott konfigurációban helyezkednek el) nyitását. Technikai szempontból a nyitási folyamat kezdeményezése az OBC feladata, a végrehajtás – vagyis a hőkések működtetése a rugós mechanizmusok rögzítéseinek elégetése végett – azonban teljes mértékben az AUX alrendszer hatáskörébe tartozik. Fontos megjegyezni, hogy még egy ilyen egyszerű feladat is körültekintő előkészületeket igényel az űrkörnyezet sajátosságaiból adódóan: a damil elégetéséhez ugyanis ismerni kell a hőmérsékletet, valamint a rendelkezésre álló energiamennyiséget annak érdekében, hogy a nyitási folyamat a lehető leggyorsabban végbemehessen, azonban más elektronikai komponens ne sérüljön meg a keletkező hő hatására.¹¹

2.5. Orientációmeghatározó és szabályzó alrendszer (*ADCS*)

A küldetések sikeres végrehajtása szempontjából szükség van arra, hogy a műhold orientációját és szögsebességét megfelelő pontossággal be tudjuk állítani, illetve vissza tudjuk mérni. A tudományos kísérlet/műszaki alkalmazás által támasztott követelmények mellett az energiamérleg fenntartása szintén olyan követelmény, amelyre az orientációmeghatározó és szabályzó alrendszer (ADCS, Attitude Determination and Control System) szintén hatással van, mégpedig a napelemtáblák megfelelő irányba történő állításával. Fenti követelmények teljesítése érdekében az ADCS felszereltsége mind szenzorok, mind pedig aktuátorok tekintetében oly módon lett kialakítva, hogy a műholdat alkalmassá tegye a küldetés során felmerülő legkülönbözőbb szituációk kezelésére. A komponensszintű felépítést a 8. ábra ábrázolja.

¹¹ Kovács Zoltán – Marosy Gábor – Horváth Gyula: *The thermal design of the thermal cutter of an antenna opening mechanism employed on a pico-satellite*. Budapest, 18th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems, 2012. 1–4.

Először az orientációmeghatározáshoz szükséges hardver-, valamint szoftverkomponenseket tekintjük át. Szenzorok tekintetében egyrészt megtaláljuk a MEMS- (Micro-Electromechanical Systems, mikro-elektromechanikai rendszer) technológiával gyártott giroszkópot, illetve magnetométert. Ezenfelül a platform külső felületére (tipikusan minden oldalra) napszenzorokat szerelnek fel, amelyekből hat darab szükséges a Nap irányvektorának rekonstruálására, amely az orientációmeghatározási algoritmus egyik bemeneteként szolgál. Egyre több CubeSat-platform szerves részét képezi továbbá az úgynevezett csillagkamera (Star Tracker), amely rendkívül pontos (szögmásodperces tartományba eső) orientációmeghatározásra képes.

Megállapítható, hogy összességében a rendelkezésre álló szenzorok jóval kisebb halmaza is elegendő lehetne ideális, zavarásoktól és zajtól mentes környezetben, ezen folyamatok jelenléte, valamint az egyes szenzoregységek korlátai azonban mindenképpen szenzorfüzítés eljárások alkalmazását teszik szükségessé. A magnetométerek a különböző külső (a világútból származó mágneses jelenségek), valamint a platformból származó belső mágneses zavarások által terheltek, a napszenzorok esetében a Föld albedója okozhat igencsak jelentős (akár 20°-os) orientációhibát. Míg a csillagkamera esetében a hosszú záridők, a műhold forgásából származó elmosódás, valamint a számítási szempontból intenzív feldolgozási algoritmusok pontos, ámde rendkívül alacsony (néhány Hz) mérési frekvenciája jelent mérnöki kihívást. Továbbá bizonyos szituációkban egyes szenzorok nem is használhatók: a Föld takarásában a napszenzorok nem szolgáltatnak mérési eredményeket, míg az árnyékot elhagyva a csillagkamerát vakíthatja el a Nap.

A szenzorok mérési adatait tipikusan a Kálmán-szűrő¹² valamely változata segítségével dolgozza fel a műhold.¹³ Abból kifolyólag, mivel a műhold dinamikáját leíró egyenlet nemlineáris, így általában az úgynevezett Unscented Kálmán-szűrőt használják fel, amelynek létezik kifejezetten műholdakra szabott változata is.¹⁴

Az orientációmeghatározás mellett az ADCS másik feladata a küldetés szempontjából meghatározott orientáció beállítása, valamint tartása. Ezen feladatnak velejárója a műhold szögsebességének szabályozása is, ugyanis ez befolyásolja az orientációs szabályzás stabilitását, ami – kiváltképp földmegfigyelő, illetve képalkotó hasznos teherrel rendelkező műholdak esetében – számos szituációban a misszió sikerességét befolyásolja. Ennek elérése érdekében alapvetően kétféle beavatkozószerrel terjedt el. Az egyik a Föld mágneses mezejével lép interakcióba mágneses dipólmomentum létrehozása által – elektromágnesként viselkedő tekercsek formájában –, míg a másik megközelítés kis méretű lendkerekeket alkalmaz, és a perdületmegmaradás elvét kihasználva végzi a műhold szabályzását.

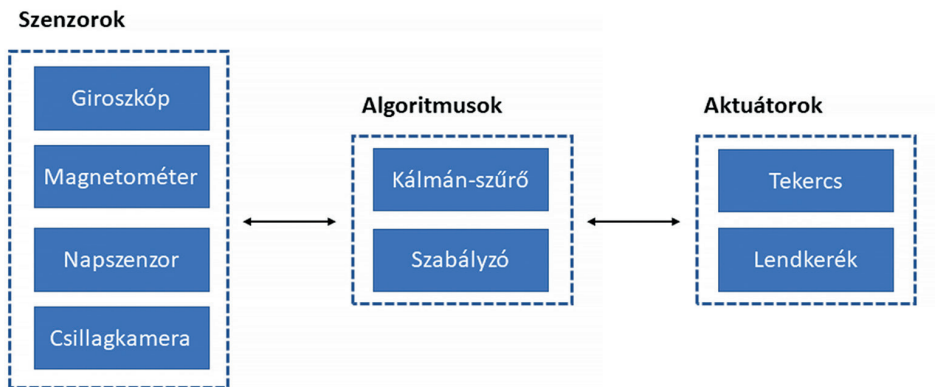
Aktuátorok esetében két okból van szükség a fenti megközelítés alkalmazására. Egyrészt a mágneses beavatkozószer csak egy kétdimenziós térben képesek szabályozni, amelynek oka, hogy amennyiben a létrehozott mágneses dipólmomentum-vektor és a Föld mágneses mezejének indukcióvektora párhuzamosak, a kifejtett nyomaték nulla. Ez a probléma nem

¹² Kálmán Rudolf Emil: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82. (1960), 1. 35–45. 35.

¹³ Eugen J. Lefferts – Markley Landis – Malcolm D. Shuster: Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 5. (1982), 5. 417–429.

¹⁴ John L. Crassidis – Landis F. Markley: *Unscented Filtering for Spacecraft Attitude Estimation.*; Matthew C. VanDyke – Jana L. Schwartz – Christopher D. Hall: *Unscented Kalman Filtering for spacecraft attitude state and parameter estimation.* Advances in the Astronautical Sciences, AAS-04-115, 2004.

áll fent a lendkerekek esetében, ennek ellenére mégsem alkalmazzák őket kizárólagos beavatkozásszervként.



8. ábra

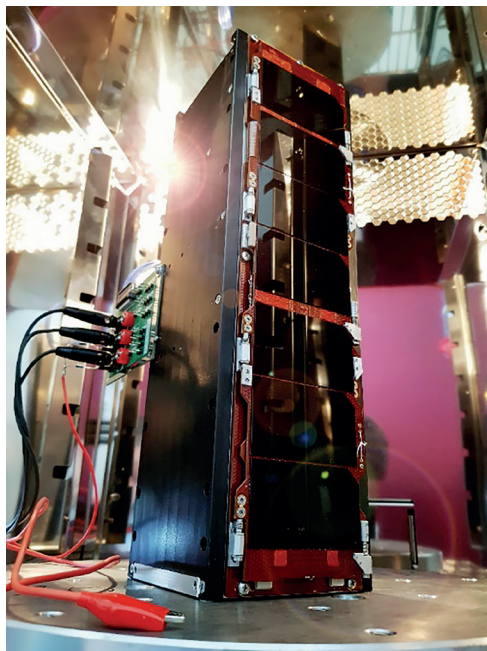
Az ADCS alrendszer felépítése. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Ennek oka a műholdra ható, úgynevezett zavarónyomatékokban keresendő, ideértve a földközeli pályán igencsak jelentős légellenállást, a napszél nyomását vagy a műhold (nem aktuált, hanem a felépítésből adódó) dipólmomentumának és a Föld mágneses mezejének interakciójaként előálló nyomatékokat. Ezek a hatások ugyanis – habár alapvetően periodikus komponensekből tevődnek össze – nem mentesek teljes mértékben az egyenkomponensű összetevőtől, ami a perdület felhalmozódását eredményezi a lendkerekekben. A szaturációt elkerülendő a mágneses beavatkozók szerepe a lendkerekek perdületének disszipációja – hiszen a tekercesek nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket.

2.6. Minőségbiztosítás

Abból kifolyólag, mivel a műhold pályára állítása után már nincs lehetőség hardveres módosítások végrehajtására, esetleges javítások elvégzésére (mint ahogy az például a Hubble űrteleszkóp esetében történt), így rendkívül fontos, hogy a platform magas megbízhatósággal rendelkezzen.

Ennek érdekében az egyes komponensek fejlesztése, illetve beszerzése során különös figyelmet kell fordítani az űreszközökre vonatkozó minőségbiztosítási szabványoknak való megfelelésre (European Cooperation for Space Standardization, ECSS) – ami részben speciális, űripari komponensek alkalmazását jelenti. Mindemellett pedig a platformot részletes, az űrkörnyezet minden lehetséges viszontagságát figyelembe vevő teszteknek vetik alá. Így többek között vákuumban, alacsony hőmérsékleten, valamint a sugárzásnak kitett komponensek esetében elemi részecskékkel/ionokkal történő behatásoknak kitéve is ellenőrzik az egyes komponenseket. Természetesen ezek a körülmények azt is megkövetelik, hogy speciális, űripari felhasználásra kialakított alkatrészeket használjanak fel a műhold integrálása során.



9. ábra

A hőkamrás tesztek az űrbeli környezet viszontagságainak leképezésében játszottak szerepet.¹⁵ Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A megbízhatóságon kívül még egy fontos szempont szükségessé teszi a sokrétű tesztelést, ez pedig az űrszemét kérdésköre. Ugyanis a világűr felelős felhasználása érdekében gondosan ügyelni kell arra, hogy az egyes műholdküldetések lehetőleg minimális mennyiségű űrszemetet generáljanak. Ez többek között azt is jelenti, hogy az egyes illékony vagy nem kellő megbízhatóságú anyagok nem alkalmazhatók egy komponensben sem. Továbbá arról is gondoskodni kell, hogy a műhold a misszió végén a Föld atmoszférájába belépve megsemmisüljön.

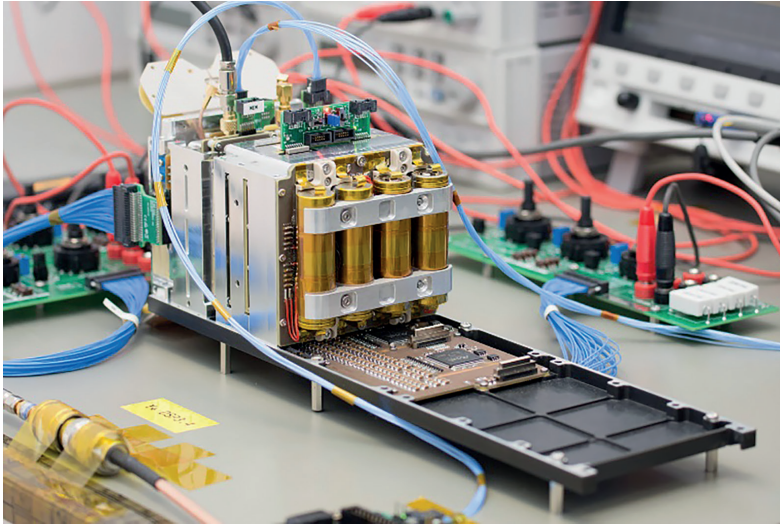
3. Missziótervezés

Egy sokoldalúan használható műholdplatform esetében a tervezési és fejlesztési folyamat korántsem ér véget magának a műholdnak a megalkotásánál. Szükség van számos olyan kiegészítő rendszerre és szolgáltatásra, amelyek azt biztosítják, hogy egyrészt a fejlesztési folyamat gördülékenyen folyjon – ami akkor kulcsfontosságú, ha a piacra bevezetve nagyobb példányszámban szükséges elkészíteni a műholdplatformot. Másrészt pedig abban nyújtanak segítséget, hogy a végfelhasználók (legyen szó tudományos kísérletről vagy ipari alkalmazásról) intuitív módon kezelni tudják a műhold által szolgáltatott adatokat.

¹⁵ A képen a 3U-s műholdplatform hőkamrás tesztelése látható.

3.1. Buszteszter

Az egyik fontos eszköz az úgynevezett buszteszter, amely egy egyedi fejlesztésű, földi kiszolgáló eszköz. Segítségével az egyes alrendszerek egyszerűen, egy, a platformra szabott eszközzel tesztelhetők. A buszteszter önmagában biztosítja a fizikai összeköttetést a tesztelendő alrendszer és a tesztelést irányító számítógép között. Használatával a fizikai interfész adott, így szabványos csatlakozók segítségével a komponens tesztelhető, nincs szükség minden egyes alkalommal és eszköz esetén további csatlakozók forrasztására, ami jelentősen leegyszerűsíti, illetve felgyorsítja a folyamatokat.



10. ábra

*A platform tesztelése során az adatok egyszerű hozzáférhetősége érdekében szükség van megfelelő interfészekre.
Forrás: a szerzők saját szerkesztése*

A buszteszter azonban nemcsak a fejlesztési, tesztelési folyamatot teszi gördülékenyebbé, hanem a pályára bocsátást megelőzően is hozzájárul ahhoz, hogy az utolsó ellenőrzések gyorsan, a műhold struktúrájának megváltoztatása nélkül elvégezhetőek legyenek. Ez azért kiemelten fontos, mivel egy esetleges módosítás azt eredményezné, hogy bizonyos tesztek ismételten el kellene végezni. A tesztek ismételt elvégzése jelentős időbeli késedelmet okozhat, ugyanis adott pályára olykor hónapokkal előre kell lefoglalni a hordozórakétát, illetve annak rakterében a POD-ot, illetve magát a startot is, így a megismételt tesztek okozta csúszás miatt az átfoglalások vesztesége is felmerülhet. A teszteket könnyítendő elterjedt megoldás még az úgynevezett Flat Sat-struktúra is, amelyben az alrendszereket nem integrálják a műhold mechanikai struktúrájába, az alrendszerek közötti kommunikációs csatornákat viszont kialakítják. Így az esetleges hibás komponensek könnyen azonosíthatók és cserélhetők anélkül, hogy a teljes műholdat újra össze kelljen állítani, ami további hibalehetőségeket, például mechanikai instabilitást idézhet elő.

3.2. Ökoszisztéma

Ahogy az előzőekben hangsúlyoztuk, a műhold platformjelleget szerves részét alkotja a felhasználók/kezelők számára kialakított interfész, amelynek segítségével a küldetés egyes paramétereit monitorozni, valamint módosítani lehet. Ezek a megoldások alapvetően két részre bonthatók: egyrészt a műveleti, másrészt pedig a tudományos operatív központra (Mission/Scientific Operative Centre, MOC/SOC).

Ezek elsődleges feladata, hogy a műhold és a földi állomás közti közvetlen kommunikáció eredményét (feldolgozva) megjelenítsék, valamint a kommunikációt irányítsák. Ehhez természetesen szükség van arra, hogy a – küldetésenként általában a Föld több pontján elhelyezkedő – földi állomások jele egy központi szerverhez eljusson, amely így konzisztensen tudja azokat a felhasználók számára megjeleníteni.

A két funkcionalitás elkülönítésére abból kifolyólag volt szükség, mivel általában az üzemeltetést, illetve a küldetés tudományos (vagy technikai) célját nyomon követő szakemberek különböznek, sőt akár más vállalat/kutatóintézet kötelékében munkálkodnak, amennyiben egy konzorciumról van szó – ez pedig korántsem ritka komplex űripari projektek esetében. Ezért a tudományos operatív központ kizárólag a telemetria megjelenítésére és elemzésére szolgál, de a műhold működését érintő parancsokat legfeljebb összeállítani és továbbítani képes az MOC számára. Ugyanis a misszió működtetésért, így a műhold vezérléséért, illetve a kiadott parancsok sorrendiségéért kizárólag a műveleti operatív központ felelős.

4. Konklúzió

Jelen cikk keretein belül ismertettük egy általánosan felhasználható CubeSat-műholdplatform fejlesztésének legfontosabb szempontjait. Ennek során áttekintettük a jelenleg megfigyelhető trendeket a kisműholdas küldetések tekintetében, valamint bemutattuk egy univerzálisan felhasználható, 3U-s platform egyes alrendszerének főbb funkcionálisitását, valamint a fejlesztés során felmerülő mérnöki kihívásokat is. Továbbá ismertettük, hogy miért rendkívül fontos a minőségbiztosítás szerepe űripari projektek esetében, mindezt pedig kiegészítettük a műholdhoz kapcsolt ökoszisztéma áttekintésével, amelynek segítségével az egyes küldetések kiszolgálása jelentős mértékben felgyorsítható, illetve hatékonyabbá tehető.

Felhasznált irodalom

- Bouwmeester, Jasper – Jian Guo: Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 67. (2010), 7–8. 854–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.004>
- Crassidis, John L. – Landis F. Markley: *Unscented Filtering for Spacecraft Attitude Estimation*. Elérhető: www.acsu.buffalo.edu/~johnc/uf_att.pdf (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- CubeSat Design Specification*. Revision 12, California Polytechnic. Elérhető: www.cubesat.org/resources (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)

- Dudás, Levente – Pápay Levente – Sella Rudolf: Automated and remote controlled ground station of Masat-1, the first Hungarian satellite. In *24th International Conference Radioelektronika*. 2014. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/Radioelek.2014.6828410>
- Kálmán, Rudolf Emil: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82. (1960), 1. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- Kovács, Zoltán – Marosy Gábor – Horváth Gyula: *The thermal design of the thermal cutter of an antenna opening mechanism employed on a pico-satellite*. Budapest, 18th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems, 2012.
- Kulu, Erik: *Nanosatellite & CubeSat Database*. Elérhető: www.nanosats.eu/database (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- Lefferts, Eugen J. – Markley Landis – Malcolm D. Shuster: Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 5. (1982), 5. 417–429. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.56190>
- Swartwout, Michael: *CubeSat Database*. Elérhető: <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database> (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- VanDyke, Matthew C. – Jana L. Schwartz – Christopher D. Hall: *Unscented Kalman Filtering for spacecraft attitude state and parameter estimation*. Advances in the Astronautical Sciences, AAS-04-115, 2004. Elérhető: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.5877&rep=rep1&type=pdf> (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- Virgili-Llop, Josep – Polat Halis – Romano Marcello: Survey, Statistical Analysis and Classification of Launched CubeSat Missions with Emphasis on the Attitude Control Method. *Journal of Small Satellites*, 5. (2016), 3. 513–530. Elérhető: https://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/50873/MR36_Survey-Statistical-Analysis-and-Classification-of-Launched-CubeSat-Missions-with-Emphasis-on-the-Attitude-Control-Method3.pdf?sequence=1&is-Allowed=y (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)