

A *MASAT 1* árapály süllyedéséről

Szerző: Forrai György

Mérnök



Budapest

2015.03.22

A címlapon szereplő fényképet a MASAT -1 csoport bocsátotta rendelkezésre

A közlemény, és a benne szereplő 1...14 ábrák a szerző szellemi tulajdona

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	Összefoglalás	3
2.1	Elméleti vizsgálatok	3
2.2	Kísérleti vizsgálatok	5
2.3	Összegző értékelés	7
3.	Műholdpályák kísérleti árapály vizsgálata	8
3.1	A műholdpálya síkjának átfordulása	10
3.2	Nagy tengely (perigeum) forgás	11
3.3	A műhold süllyedése, félnagy tengelyének rövidülése	13
3.4	A pálya alakja, excentricitás arányának (e) csökkenése	13
3.5	A műhold keringési periódusidejének változása	14
3.6	A pálya hajlásszöge (i)	14
3.7	Az úridőjárás, naptevékenység hatása	15
4.	Az árapályról általában	17
4.1	Árapály vizsgálati viszonylatok	18
5.	Földközeli műholdpályák elméleti vizsgálata	19
5.1	Földközeli műholdpályák árapály- geometriai modellezése	20
5.1.1	A geometriai vizsgálat változói, különleges helyei	20
5.1.2	A geometriai modell dimenzió nélküli formában	22
5.1.3	Ekvipotenciális gömbhéj a központi testben	23
5.2	Földközeli műholdpályák fizikai modellezése	25
5.3	Az árapály munka meghatározása	25
5.3.1	A radiális gyorsulási vektor, és árapály nyomaték munkavégzése	26
5.3.2	A tengelyirányú gyorsulási vektor hatása	27
5.3.3	Árapály csatolási tényező (Φ) és árapály munka	28
5.4	Az árapály munka hatása a földközeli műholdpályákra	31
5.5	Árapály- energetikai pálya kritériumok	32
5.6	Műholdpályák árapály-energetikai értékelése vetületi képeik alapján	35
5.6.1	Műholdpályák vetületi képeinek alaktana	35
5.6.2	A pályák vetületi képének energetikai jelentése	38
6.	Távoli égitestek árapálya	39
6.1	A feltételezett marsi Phobos' Deimos kishold árapály törése	39
6.2	Űrszondák flyby anomáliái	41
7.	Irodalom	43

1. Bevezetés

Az első magyar műhold küldetése nem ért véget azzal, hogy tervezett programját sikeresen teljesítve visszatért! Jól dokumentált útját szerte a világon számos űrhajózás iránt érdeklődő kutató és amatőr követte. Sokuk számára a munka csak most kezdődik, vagy folytatódik a tapasztalatok és a mérési adatok feldolgozásával.

Bár a MASAT-1 nem nagy tömegű, útjából így is nyerhetők olyan következtetések, amelyek a nála sokkal nagyobb égitestekre,- csillagokra, galaxisokra is érvényesek!

Az űrben ugyanis „tudott úgy viselkedni, ahogyan a nagyok”! Mivel pedig pályája közelebbi, és pontosabban mérhető- általa jobban megismerhetők azok szokásai is. Legalább is, ami az égitestek közötti *árapály súrlódás* hatását illeti. Mert bár tudható, hogy a Föld és a Hold az árapály miatt távolodnak egymástól, továbbá a gázbolygók holdjainak tömegét is az forralja, azonban hogy mi mindent okozhat még szerte a világmindenségben, arról kevés az információ.

A MASAT-1 útjából következő, a továbbiakban bemutatott eredmények a szerző erre irányuló általánosabb vizsgálatainak bevezető ismertetése.

2. Összefoglalás

A közlemény nem próbálkozik a MASAT-1 elsődleges feladatának ismertetésével - arra alkotóinak, és a programban részt vállaló amatőr rádiósoknak nagyobb kompetenciája van. Témája egy ahhoz kapcsolódó amatőr űrhajózási- csillagászati vizsgálat, melyre lehetőséget a műhold sikeres útja, és pályadatainak [1] hozzáférhetősége adott.

Szerző köszönetet mond mindenkinek, aki a munkáját elősegítette.

2.1 Elméleti vizsgálatok

A MASAT-1 kísérleti pálya vizsgálatainak megkezdését elméleti megfontolások ösztönözték, azok szolgálhatnak magyarázatul a tapasztalt jelenségekre is.

A csillagászati árapályról általánosan a 4. fejezet szól, a földközeli műholdpályák elméletének kidolgozására történt próbálkozást pedig vázlatosan a 5. fejezet ismerteti.

Az elméleti vizsgálat, és a kísérleti eredmények interpretálása nem tudományos szintű, csupán a szerző véleményét tükrözi. Az összefoglalásban csak fontosabb szempontjairól történik említés:

- Az elmélet két test: a *távoli* (földközeli műhold) és a *központi* (Föld) jellegében eltérő árapály kapcsolatát elemzi. A távoli test „árapálya” a központiban energia disszipáció révén munkává alakul, ami visszahat pályaparamétereik változására.

Bár viszonylatuk megváltoztatható, azonban az adott esetben a fordított (távoli... Föld, központi... műhold) elhanyagolható.

- Földközeli műholdpályák árapály modellezése során a Föld nem tekinthető elméleti tömegpontnak- valamennyi pontja geometriai és fizikai sajátosságait külön kell figyelembe venni! Ami megnehezíti a feladat megoldását, és valamely általánosítható, például *hasonlósági* eljárás kidolgozását indokolja. Emiatt már a geometriai (7. ábra) és a fizikai (8. ábra) modellek felírása is arányszámokkal történt.
- Hasonló okból vált szükségessé a távoli által a központi test egészében keltett árapály potenciál munkává alakuló hányadát kifejező, azonos típusú égitestek vizsgálatában univerzálisan használható „*árapály csatolási tényező*” (Φ) *bevezetése*. Ez a jellemzően kísérleti úton meghatározható arányszám a feltételezés szerint a központi test lehetséges energia disszipációt okozó *egyedi* fizikai tényezőinek hatását összevonva fejezi ki ($\Phi=0\dots 1,0$).
Ismeretében a távoli test miatt a központiban ébredő árapály munka kiszámítható, ami nem csupán a műholdpályák perturbációinak közvetlen oka, de van kapcsolata a földbelsőben lejátszódó, a geofizika tárgykörébe tartozó folyamatokkal is.
- A műholdak és az égitestek árapály okozta pálya perturbációi hasonlóak, amire a kísérleti részben utalások történnek. Elméleti vonatkozásban főképpen a „szinkron” pályának nevezett árapály- energetikai kritérium vizsgálata, és általánosítása (mint „Stacioner Távolságú= ST) említhető. Csillagászati szempontból érdekes, hogy az ilyen pályákon huzamosabb ideig tartózkodó égitestek (pl. holdak) magját a nagyobb tömegű test árapálya felhevítheti, sőt megolvasztva szét is vetheti! Vagyis hogy az egymáshoz közeli égitestek törése nem csupán a Roche sugáron belül, hanem az ST kritérium pályán tartózkodva, illetve legnagyobb valószínűséggel egyidejű ráhatásuk esetén is megtörténhet.
- A műholdpályák keringési iránya bármely pontjukban nem a távoli csillagokhoz, hanem a Föld forgásához viszonyítandó! Így *direktnek* az óramutató járásával ellentétes, *retrográdnak* pedig az azonos keringési irányú *műholdpálya szakaszok* tekinthetők- az árapály munka előjele ettől függ! Ezzel kapcsolatban megemlítendő, hogy a műholdpályák Mercator hengervetületi képe (9...14 ábrák), különösen, ha a térkép alattuk a Föld forgása szerint dinamikusan változik, szemléletesen és egyértelműen mutatja a különböző

szakaszaikon létrejövő árapály munka előjelét. Következésképpen a dinamikus hengervetületi térképek nem csupán tájékoztatásra, hanem a műholdpályák árapály energetikai jellemzőinek értékelésére is alkalmasak!

Az elméleti munkarész azonban még nem kész, a mérésekkel összhangban lesz befejezhető. Azután is megőrizve félempirikus jellegét, ahogyan a forrás programok is- azonban kiegészítve egy fontos tényezővel: az árapály energetikával.

2.2 Kísérleti vizsgálatok

A MASAT-1 útjára vonatkozó *kísérleti vizsgálatok* eredményeinek hitelessége a forrás (n2yo adatbázis [1]) pontosságának, és az adatkezelés, feldolgozás módjának megfelelő. Amiről a 3. fejezet tájékoztat, ismertette a pályaparaméterek adatgyűjtési és feldolgozási metodikáját, bemutatva, és esetenként más műholdakéval, égitestekével is összehasonlítva annak eredményeit. A vizsgálatba 25 db műhold lett bevonva, amiből 7 db cubesat már visszatért. A többi vizsgálata még folyamatban van, időközi eredményeik közzététele szintén tervezett.

Az n2yo adatbázis napi, és másodperc jelentései alapján, 2012.03.16- 2015.01.09 között a MASAT-1 következő pályaparamétereinek vizsgálata történt (a Hold analogikus változásaira is utalva):

1. A műholdpálya síkjának körbejárása (átfordulása)

A MASAT-1 pályasíkja (a másik hat cubesat- hoz hasonlóan) a távoli csillagokhoz képest naponként átlagosan ~2,47 fok késést (periódusideje 0,39 év/ford) szenvedett, útja során 7,3 -szor fordult át. Az átfordulás szögsebessége a műhold félnagy tengelyének csökkenésével növekedett, feltételezhetően részben az árapály, részben az atmoszférikus ellenállás hatására.

(A Hold pályasíkját az árapály 18,6 év alatt fordítja át, ebből származtatható a *drakonikus holdhónap*).

2. Perigeum forgása

A MASAT-1 perigeum forgásának modellje az 1. ábrán látható. Periódusideje útjának nagy részén ~268 nap (~0,74 év/ford) volt, ami a zuhanása során csökkent. Útja alatt közelítőleg négy teljes fordulata történt (2. ábra). (Megjegyzendő, hogy más műholdaké széles tartományban -40 nap/ford- tól több évig- változott.)

A műholdpálya nagy tengelyének folyamatos elfordulása szükségszerűen más paramétereire - süllyedési sebességére, excentricitására, keringési periódusidejére) is kihatott, a mérésekből is kimutatható változásukat, oszcillációjukat idézve elő.

(A Hold árapály- perigeum forgásának periódusideje 8,847 év- ebből származtatható az *anomalisztikus holdhónap*).

3. Süllyedése, nagytengelyének rövidülése

Kezdeti süllyedése ~120 m/d, ami a zuhanás végén ~30 km/d-re növekedett. Süllyedési görbéje más paraméterekhez (excentricitás, periódusidő) hasonlóan ingadozik. (3. ábra)

(A Hold túl a földi ST kritérium pályán nem süllyed, hanem évi 38-45 mm-t távolodik.)

4. Alakja, excentricitás aránya

A MASAT-1 pálya excentricitás- aránya a vizsgálat kezdetén $e = 0,773$ volt, ami fokozatosan $e = 0,0006$ -ig csökkent- pályája körkörösödött. Görbéjének ingadozása úgyszintén észlelhető volt (4. ábra).

(A Hold excentricitás- aránya szintén ingadozó.)

5. Keringési periódus ideje

A MASAT-1 kezdeti keringési periódusideje $\tau \sim 102,5$ perc volt, ami $\tau \sim 87,3$ percre csökkent.

Görbéje szintén ingadozó (5. ábra), ami nagytengely változásával hozható összefüggésbe.

A Hold keringési periódus ideje ezzel szemben növekedik (távolodik).

6. Hajlásszöge

Pályahajlásszöge ($i = 69,5$ fok) alig változott, közvetlenül a zuhanás előtt ~0,1 fok csökkenése volt tapasztalható.

(Más földközeli műholdak pályahajlásszöge is stabil, a távoliké viszont észlelhetően nő, illetve ingadozik, ahogyan a holdpályáé is.)

7. Az űridőjárás hatása

Bár nem árapály jelenség, rövid ideig (2012.08.16- 2013.03.14 között) az űridőjárás, és egyéb eseményeknek a MASAT-1 pályájára gyakorolt hatása is figyelve volt (6. ábra). Megmutatkozott, hogy napkitörések után, néha több napon keresztül is a műhold süllyedése az átlagosnak többszörösére (~1,0 km/d) növekedett. Más paraméterei azonban nem változtak szignifikánsan- azok feltételezhetően árapály jelenségek.

8. A műholdpálya energetikai értékelése vetületi képei alapján.

A MASAT-1 pályájának szinuszoid alakú (Mercator) hengervetületi képe (15. ábra) teljes hosszában direkt keringési irányú (alatta a Google térkép balra fordul el), maximális kitérése (latitude) a pálya hajlásszögét közelíti. Emiatt pályája energiaveszteséges, süllyedése során részben visszazármasztatta a Föld korábban neki „kölcsonzott” forgási impulzusát, és energiáját.

Ha a Holdról készülné vetületi kép, hasonlóan mutatkozna, csak kitérése lenne sokkal kisebb, és lassabban fordulna jobb felé- keringése ugyanis a Föld forgásához viszonyítva retrográd irányú.

2.3 Összegző értékelés

A kísérleti vizsgálat egyfelől megmutatta a MASAT-1 perigeumforgásának létezését, másfelől több pályaparaméter (nagytengety, periódusidő, excentricitás) ahhoz igazodó oszcillációját.

Emellett szemléltette a természetes és mesterséges égitestek pályaváltozásainak hasonlóságát.

Több közülük még a nagyságrendekkel nagyobb atmoszférikus ellenállástól is függetlennek mutatkozott, és kizárólag az árapály energetikai ráhatásával volt magyarázható, igazolva a még csak vázlatosan kidolgozott elméleti feltevéseket.

Mindez a már visszatért többi cubesatra is érvényes, diagramjaik hasonlóak. Azonban mindegyiknek voltak olyan sajátosságai, amelyek összehasonlító vizsgálatukat indokolják, és aminek elvégzése a szerző szándékában van (adatgyűjtésük szintén megtörtént).

A jelen témairól közlemény nem adhatott teljes körű, befejezett megoldást.

Célja egyebek között annak indoklása, hogy a földközeli műholdpályák árapály vizsgálata egyedi elméleti és kísérleti vizsgálati metodikát igényel!

Jelenleg ugyanis meg sem említik más pálya perturbációt okozó tényezők mellett (luni- szoláris, sugárnyomás), melyekhez képest hatása földközeli műholdak esetén nagyságrenddel nagyobb.

Kivéve az atmoszférust, ami közvetlenül a földfelszínnél ugyan meghatározó, azonban a felső légkörben már azonos nagyságrendű.

Az árapály hatásának figyelmen kívül hagyásával végzett légköri sűrűség vizsgálatoknak, valamint élettartam méretező eljárásoknak vélhetően módszertani hiányosságuk van!

A MASAT-1 útról itt bemutatott diagramok csupán valamely átfogóbb kutatás első lépéseit jelenthetik. Amelyet azonban, mivel szükségesnek és ígéretesnek gondolható, és mert eredményei nem csupán az űrhajózásban, hanem a csillagászatban, továbbá más elméleti, és alkalmazott tudományágakban is hasznosak lehetnek, a jelenleginél megfelelőbb feltételekkel, szélesebb körben lenne célszerű folytatni.

Mert bár a távoli űrmissziók eredményei lenyűgözőek, a legnagyobb alkalmazási területe mégis a földközeli műholdaknak van, melyek pályái szenvedik el a legtöbb zavaró hatást.

Rengeteg kérdés, feladat maradt még az atmoszférikus ellenállás, és más jelenségek kutatásában, melyek különválasztva aligha válaszolhatók meg.

Az első, a legfontosabb lépés természetesen magának a műholdnak a megalkotása és felbocsátása volt. A következő szerkezetének, és programjának tervezésekor azonban érdemes lenne figyelembe venni a korábban szerzett tapasztalatokat, amihez talán ez a közlemény is hozzájárulhat.

3. Műholdpályák kísérleti árapály vizsgálata.

A kísérleti vizsgálat 2012.02.04- én, a DEIMOS - műhoddal kezdődött, majd fokozatosan kibővült az ESA által 2012.02.13-án, Kouroun felbocsátott 9 db (köztük a MASAT-1), és később további-összesen 25 db műhold megfigyelésével.

Lehetőséget rá az n2yo internetes adatbázis [1] nyújtott, ami több tízezer műhold, rakétatest adatait ismerteti napi és másodperc-jelentések, a számítógépes programmal rendelkezők számára pedig időszakosan frissített „kétsoros program adatok” (TLE) formájában.

Bár az időszakos mérésekkel korrigált, félempirikus adatbázis amatőr felhasználók igényeinek megfelelően készül, a nagyszámú adat feldolgozása után mégis szignifikáns eredmények adódtak. (A továbbiakban a „mérés” kifejezés ezekre a tényleges mérésekre visszavezethető tevékenységet jelenti).

A vizsgálat metodika kidolgozásának kezdeti szakaszától annak ellenére, hogy nagyobb odafigyelést igényelt, a napi és másodperc jelentések kimásolása, és azonnali feldolgozása mutatkozott előnyösebbnek. Attól kezdve, hogy a pályaváltozások törvényszerűségei megmutatkoztak, a mérések gyakorisága, és időpontja tervezhetővé vált. Gyakoriságuk különleges szituációkban (pl. napkitörések, a műhold zuhanása stb.) esetén növekedett.

Már a vizsgálat kezdetén megmutatkozott, hogy a legjellemzőbb pályaadatok a másodpercenként frissített jelentésekből akkor vehetők fel, amikor a műhold éppen az *egyenlítői síkon* halad át, s így a felszálló, leszálló csomópontjainak hosszúsága (longitude) és magassága (altitude) megismerhető. Belőlük számítható ugyanis a műholdpályák árapály okozta átfordulása, valamint perigeum (nagytengeley) forgása.

Esetenként a pályák más különleges, például minimum- maximum magasságának, vagy direkt és retrográd keringési irányait elválasztó pontjaiknak felvétele, és rögzítése is megtörtént (1. ábra).

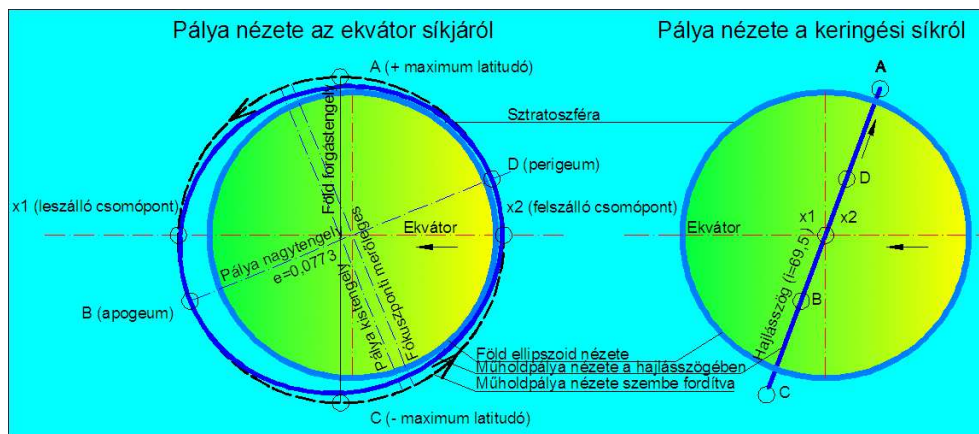
Egyes műholdak pályadatai vonatkozásában bizonytalanságot okozott hajtóműveik lehetséges működése, ami azonban az adatokból általában jól észlelhető volt. Így például a TRMM műhold ~400 km magasságának tartására átlagosan két hetenként hajtottak végre korrekciót. A köztes időpontokban viszont (jelenleg már süllyedése kezdődött) a megfigyelések zavartalanul végezhetőek voltak. A cubesatok esetében pedig eleve nem történhetett hajtóműves korrekció. Más jellegű,

belső, vagy külső pozicionálás, pl. napelemek nyitása viszont lehetséges volt, és erősen befolyásolhatta pályáikat.

Összességében közel százezer adat lett így rögzítve, nagy részük fel is dolgozva, amiből most csak a MASAT-1 –re vonatkozóak kerülnek ismertetésre.

Az 1. ábrán az ESA program műholdjainak kezdő pályája látható, két nézetben:

- a földi ekvátor síkjából, amelyen a pálya ferde projekciója, és merőlegesen beállított, valóságos alakja is látható,
- a keringési síkból, ahol a pályasík vonalként látszódik



1. ábra A MASAT-1 pályája és vizsgált pontjainak nézetei az ekvátor és a keringési síkok felől

Az ábrán fel lettek tüntetve azok a különleges pontok, ahol a leggyakoribb mérési mintavételek történtek, melyek feldolgozása alapján voltak a perturbációk azonosíthatók:

- Felszálló és leszálló csomópontok : $x_1; x_2$
- Minimum és maximum magasság (altitude.): B; D
- Minimum és maximum szélesség (latitude) : A; C

Felületesen szemlélve a pálya szinte kör alakú. Habár excentricitása már a mérések kezdetekor is csekély volt ($e \sim 0,773$), azonban további csökkenése így is nagy szerepet játszott a műhold süllyedésében, ahogyan perigeuma az atmoszféra sűrűbb rétegeibe merült.

Az 1. ábrán a pálya nagytengelyének pillanatnyi helyzete látható körbefordulása közben. Képzeltető, hogy milyen nagymértékben változott egy cikluson belül az árapály munkája, miközben perigeuma váltakozva áthaladt az egyenlítői síkon vagy a legnagyobb szélesség felett. Ami végül magának a műholdnak a pályaparamétereit is befolyásolta, és aminek kimutatása az adatfeldolgozás egyik célja.

A mérési adatok, és a számítási eredmények egymás után másolható Excel táblázati sorokba, és tömbökbe lettek rendezve (műholdanként több ezer sor).

A feldolgozás az adatok megfelelő előkészítésére, és a keresett paraméterek meghatározására irányult. Elsőként valamely kezdő időponttól, a fellövéstől, vagy a vizsgálat megkezdésétől eltelt másodpercek száma lett meghatározva.

Más, hiányzó paramétereket is a mérési adatokból kellett kiszámítani: pl. a pálya félnagy tengelyét, excentricitását, és más informatív, vagy közbenső adatokat.

Azokról a paraméterekről, amelyek stabilnak mutatkoztak (például a hajlásszög), nem készült diagram. A szignifikánsan változókról viszont, mint például a nagy tengely (nem relativisztikus) perigeum forgása, informatív diagramok készültek, melyek az adatfeldolgozás, és az eredmények ismertetésével a továbbiakban láthatók.

A későbbiekben valamennyi ESA műhold összehasonlító vizsgálata is tervezett.

3.1 A műholdpálya síkjának átfordulása

A műholdak pályasíkja a távoli csillagokhoz képest keringési idejük alatt teljes kört bejárva periódikusan átfordul, ahogyan az égitesteké is..

Meghatározásához ki kellett számítani, és össze kellett hasonlítani a Föld és a műhold eltelt idő alatt történő elfordulásának szögét.

A földpálya elfordulása (α_K) időkorrekcióval lett figyelembe véve:

$$\alpha_K = \tau * 360/24 * (1 - 1/365,24) \quad \text{fok} \quad /.1$$

A pályasík tényleges elfordulása (α_T) a műhold egyenlítői csomópontoknál mért hosszúságából (longitude), szögekésése kettőjük különbségeként adódott.

A MASAT-1 méréses vizsgálta 2012.03.16-án kezdődött- utolsó napján 2541,5°- szögekésés (átlag 2,47fok/nap) volt mérhető. Pályája tehát évenként ~2,5-ször fordult át, lassan növekvő sebességgel. Tekintettel meredekségére, miatta ismétlődően huzamosabb ideig földárnyékba került, ami megterhelhette energia ellátó rendszereit. Mégis, utolsó adásáig (ami a rendelkezésre álló információ szerint 2015.01.09-én 21:21:43 kor következett be), állta a világűr hidegét!

Mindez nem magyarázható csupán az atmoszféra nagyobb perigeumi ellenállásával, mivel igen távoli műholdaknál, égitesteknél is jelentkezik – feltételezhetően mint árapály jelenség! Másfelől az átfordulás szögsebessége a műhold süllyedése során gyorsult, ami részben az atmoszférikus ellenállása növekedésével, részben árapály sűrűlődsével magyarázható- a földfelszínhez közeledve mind a kettő növekedik. Kérdéses azonban az arányuk- hogy az átfordulási szögsebesség nagyságrendekkel kisebb ütemben gyorsult, mint ahogyan a levegő sűrűsége zuhanás közben nőtt? Emiatt az árapály szerepe és súlya ebben a folyamatban további elméleti és kísérleti vizsgálatokkal tisztázandó.

3.2 **Nagy tengely (perigeum) forgás**

A műholdpályák nagy tengelyének forgása a pályasíkban a másodperc jelentések feldolgozásakor nyilvánult meg, és vált a vizsgálatok egyik alaptényezőjévé. A felszálló-leszálló csomópontok megfigyelése során megmutatkozott, hogy a műhold egyenlítői magassága az ellipszis pálya körbefordulásának megfelelően változik.

Később más, a Föld légkörével nem érintkező távoli műholdakkal is megismételve a vizsgálatot bebizonyosodott, hogy az mindegyikükre (beleértve az igen kis excentricitású, körpályán haladó műholdakat is) érvényes árapály jelenség!

Egyébként a Holdnak (8,847 év), és az árapály elmélet szerint minden más égitest- pályának is kell, hogy legyen árapály okozta perigeumforgása. Aminek periódusideje függ a távolságtól, a pálya hajlásszögétől, és excentricitásától.

A MASAT-1 és a többi cubesat perigeumforgásának periódusideje kezdetben ~268 -270 nap volt, ami a zuhanásuk előtti, kisebb magasságon csökkent. A program két másik, még keringő műholdjához valamennyivel több: a nagyobb tömegű ALMASAT- 1-é ~282 nap, az 1450 km körpályán keringő LARES műholdé ~380 nap.

A perigeumforgás vizsgálata legpontosabban akkor végezhető, amikor a műhold áthalad az egyenlítői síkon, vagyis a felszálló és a leszálló csomópontoknál. Ekkor az egyenlítői magassága (altitude) a perigeum és az apogeum között változhat. Jellemző állapotai:

1. **Nagy tengelye az egyenlítői síkba fordul.** Ekkor a pálya félnagy tengelye a felszálló és leszálló csomóponti magasságok átlagaként közelíthető.
2. **Nagy tengelye az egyenlítői és a pályasík metszövonalára merőleges.** A felszálló és leszálló csomópontok egyenlítői magasságai az ellipszis pálya fókuszponti merőlegesének (semi- latus rectum) hosszával egyezők.

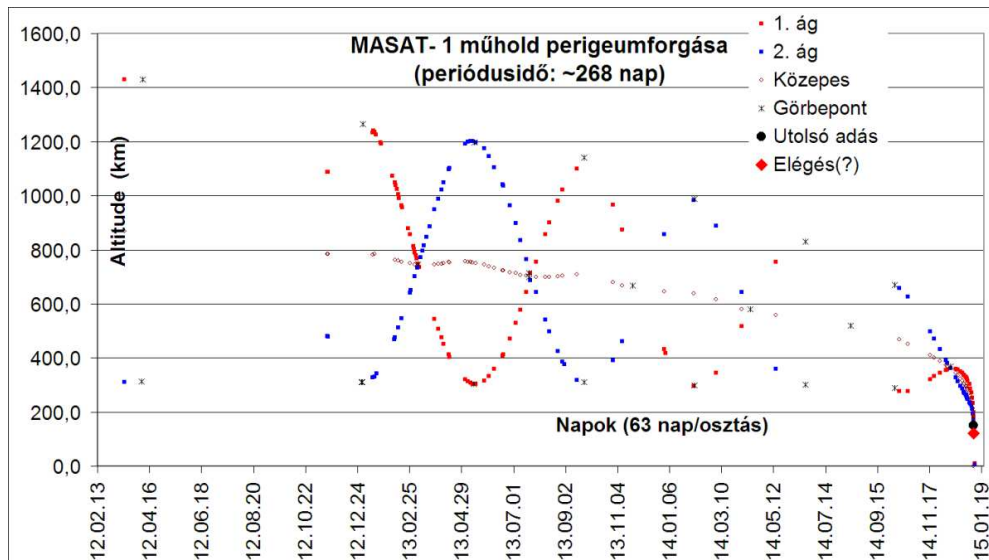
A 2. ábra a MASAT-1 műhold perigeum forgását mutatja be. A vízszintes tengelyen a dátum, a függőleges tengelyen a műhold felszín feletti magassága (altitude) látható.

A görbe két ága természetesen ugyanazon test útját jelöli ki, azonban fáziskülönbséggel. A perigeum forgás sajátosságai így rajzolódnak ki a legszembetűnőbben.

A „középső” pontok az ellipszis pálya szimmetria középpontjának változását mutatják perigeumforgása közben, excentricitás távolságának megfelelően.

Az első két mérési pont kevéssel a felbocsátása után készült. Később egy teljes perigeum forgási periódus, és legvégül a zuhanási szakasz gyakoribb mintavétele történt, melyek alapján kirajzolódtak a folyamat jellegzetességei.

A pálya perigeuma hosszú ideig stabil volt, főképpen apogeuma csökkent. Ahogyan alakja körkörösödött, és egyre hosszabb ideig tartózkodott az atmoszféra sűrűbb rétegeiben, süllyedési sebessége fokozódott.



2. ábra: A MASAT-1 perigeumforgásának magassági görbéje

„Zuhanása” kezdetéhez egyértelmű kritérium nem támasztható. 2014.11.22-én az 1. ágon inflexió pont látható, megtörve a máshol monoton növekvő emelkedő ágot, majd kettőjük találkozási pontja után szinte azonnal süllyedésbe fordul, követve a 2. ágot. A zuhanás kezdetének feltételelesen ezt az időpontot tekintve, az három szakaszra bonthatóan közelítőleg 48 napig tartott:

- Az inflexió ponttól az 1- 2 ágak találkozásáig (~2014.12. 08-ig), ~16 nap)
- A találkozási ponttól az 1. ág lokális maximumáig (2014.12.12-ig, ~4 nap)
- Az 1. ág lokális maximumától a műhold elégéséig (2015.01.09-ig, ~28 nap)

Utolsó rádiós kapcsolata 2015.01.09 21:21:43-kor történt- mikor magassága 160 km lehetett. Vagyis ebben a magasságban még nem hevült túl. Megsemmisülésének kezdete egyes források szerint 23h 35 min –kor következett be, amihez ~135 km tartozik.

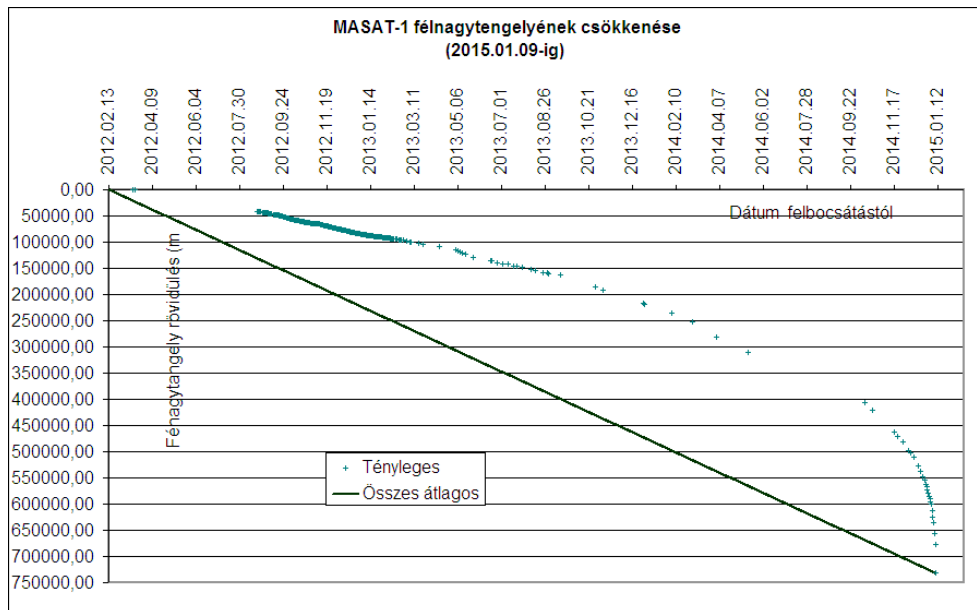
Ugyanez a legtöbb cubesatnál is hasonlóan játszódtott le, csak az időtartamok eltérőek.

A perigeumforgás diagram ebben a formában szemléletesen mutatja a földközeli műholdak süllyedését kísérő atmoszférikus és árapályhatásokat. Maga a perigeumforgás ugyanis árapály jelenség, a süllyedés viszont főképpen az atmoszférikus sűrűlódás miatt lép fel.

Az is belátható, hogy a nagytengely forgása miatt változó árapály nyomatókat a pálya alakjának, és más paramétereinek (vezérsugara, nagytengelye, excentricitása, keringési periódusideje, stb.) szintén követnie kell, ami azok mérés során tapasztalt ingadozásainak magyarázatául szolgálhat.

3.3 A műhold süllyedése, félnagyengelyének rövidülése

A műholdpálya süllyedése, energiavesztesége félnagyengelye rövidülésével szemléltethető, ami a napi jelentések perigeum, és apogeum adataiból volt meghatározható (lásd 3. ábra). Problémát jelent azonban, hogy ebben a folyamatban nem csak az árapály, hanem az atmoszférikus ellenállás is részt vett, és hogy kettőjük hatása pontosan még nem különíthető el. Ráadásul a MASAT-1 perigeumi szakaszán a végzett becslése szerint az atmoszférikus ellenállás több nagyságrenddel meghaladta az árapály hatását.

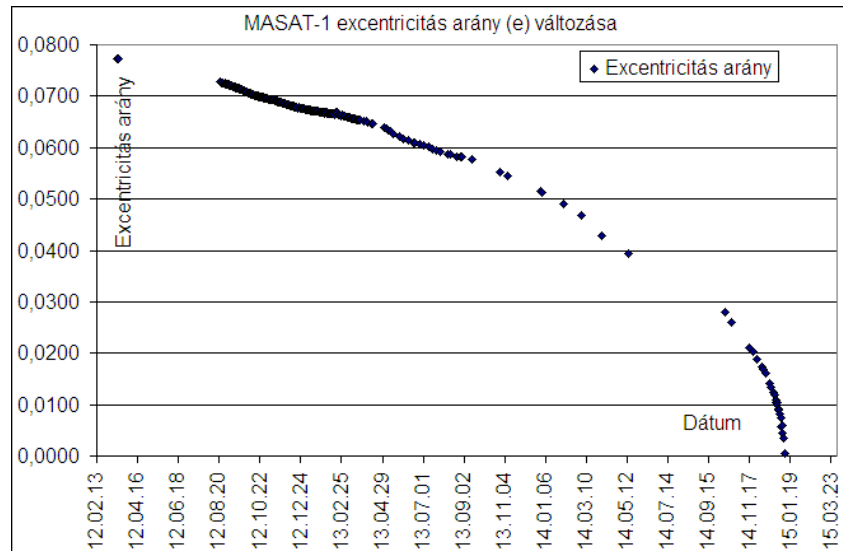


3. ábra: A MASAT-1 félnagyengelyének csökkenése

A monoton változó görbén periodikus ingadozás látható, ami más paramétereknél (excentricitás, periódusidő) is hasonlóan jelentkezik, és aminek lehet kapcsolata a műholdpálya árapály miatti perigeum forgásával. Ez a jelenség további ellenőrzést igényel.

3.4 A pálya alakja, excentricitás arányának (e) csökkenése

A pálya excentricitása a napi jelentések perigeum és apogeum magasságából volt számítható. A MASAT-1, és a többi cubesat kis excentricitás arányú ($e \sim 0,0775$) pályáról indult, majd fokozatosan alakult át körpályává. Az excentricitás görbe szintén ingadozó (lásd 4. ábra).

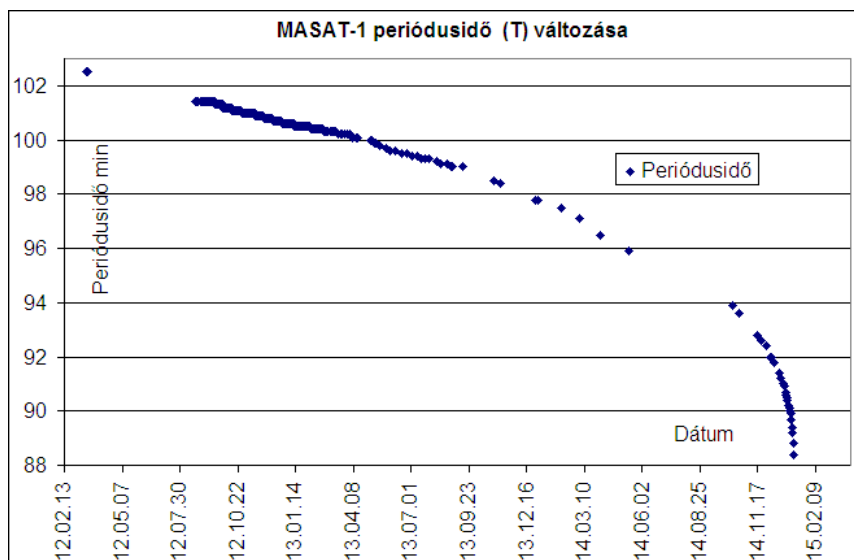


4. ábra: A MASAT-1 excentricitás aránya csökkenésének görbéje

Hasonló jelenség egyébként mindegyiknél, még az atmoszférán kívüli körpályán keringő LARES műhold esetében is mutatkozott. Vagyis ez árapály jelenség.

3.5 A műhold keringési periódusidejének változása

A műholdpálya keringési periódusidejének figyelése a napi jelentések alapján történt (5. ábra) Esetében szintén tapasztalható volt a görbe ingadozása, ami a nagytengely hosszának periodikus változásával magyarázható.



5. ábra: A MASAT-1 keringési periódusideje csökkenési görbéje

3.6 A pálya hajlásszöge (i)

A műholdpálya hajlásszöge a napi jelentésekből 0.1 fok pontossággal értékelhető.

A MASAT-1, és a többi cubesat vonatkozásában azonban csak közvetlenül a zuhanásuk előtt volt észlelhető ekkora csökkenés.

Nagy excentricitású, távoli egyenlítői úrobjektumok esetében viszont a hajlásszög intenzívebb növekedése tapasztalható. Például egy 125.000 km apogeumú rakétatest pályahajlásszöge egy év alatt ~10 fokot nőtt.

Emellett nem csupán a hajlásszög monoton növekedése, hanem oszcillációja is megfigyelhető, ami valószínűsíthetően szintén árapály jelenség.

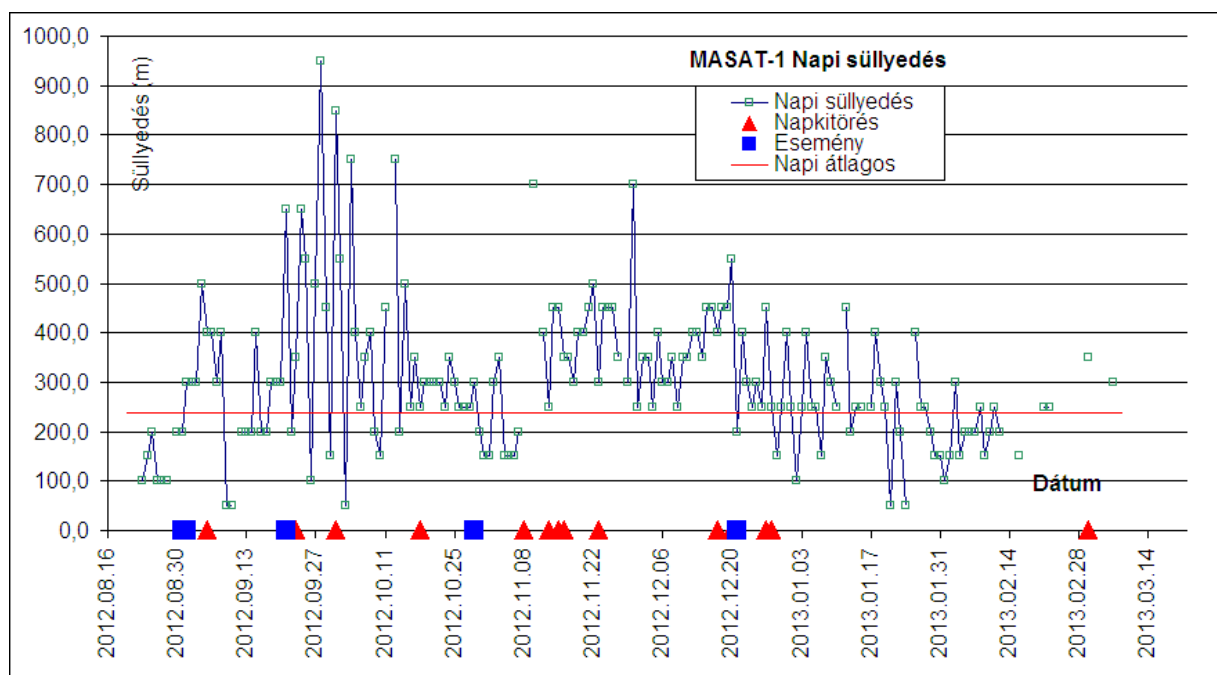
3.7 Az űridőjárás, naptevékenység hatása

Ez a fejezet nem az árapály, hanem az atmoszférikus ellenállás hatását mutatja az űridőjárás függvényében. Habár a jelenség inkább az űrmeteorológia tárgykörébe tartozik, azonban az árapály és az atmoszférikus ellenállás egymásra hatásának megismerése, és különválasztása céljából rövid ideig ilyen jellegű vizsgálatok is történtek.

A 2012-13 évekre fokozott naptevékenység volt jellemző, gyakori napkitörésekkel, amelyekre a földközeli műholdak nagyon érzékenyen reagálnak.

A diagram (6. ábra) a MASAT-1 süllyedését mutatja a napi jelentések adatai alapján, 2012.08.16-2013.03.14 között.

Vízszintes tengelyén lettek feltüntetve az előforduló napkitörések (pl. 2012.09.27- C4.4; 2012.11.9-B.6), és egyéb események (pl. nap- éj egyenlőség, napfordulók), a függőlegesen pedig a műhold napi süllyedése.



6. ábra Az űridőjárás hatása a MASAT-1 süllyedésére 2012.08.16- 2013.03.14 között.

A MASAT- 1 átlagos napi süllyedése ebben az időszakban már ~237 m/d volt, amihez képest a C.4.4 napkitörés esetén 1000 m/d –süllyedés is történt. Más paraméterei azonban nem változtak szignifikánsan- azokon csak az árapály kevésbé intenzív hatása érvényesül.

Látható az is, hogy valamely nagyobb kitörés hatására megbolydult földi légkör hosszabb időn keresztül sem tért vissza kiinduló állapotába.

A naptevékenység hatását a felső légkör állapotára a Nap 10,7 cm hosszúságú rádiósugárzása intenzitása alapján, és műhold süllyedés mérések alapján vizsgálják.

Megmutatkozott, hogy a földi légkör sűrűsége annak 11-éves ciklusa szerint változik (400 km magasságban [10]):

- Fokozott naptevékenység idején, nagyságrendje: $\log_{10}\rho = -11,9 \text{ kg/m}^3$
- Nyugodt időszakában, nagyságrendje: $\log_{10}\rho = -12,4 \text{ kg/m}^3$.

Nemcsak a naptevékenység, de a CO₂ hűtő hatása, és valószínűsíthetően más jelenségek is hozzájárulhatnak a termoszféra említett, tartós sűrűség változásához.

A napkitörések után a MASAT-1 esetében is tapasztalt rövid idejű, (néhány nap lefutású) süllyedési csúcsok azonban más jellegű sűrűség ingadozására utalnak. A Napból érkező részecskeáramlat ugyanis ekkor feltételezhetően asszimmetrikusan torzítja a felső légkör alakját- ráadásul a Föld forgása, és keringése miatt változóan. Emiatt a napkitörések hatása a cubesatok aktuális pályasíkjának megfelelően érvényesülhetett.

A MASAT-1 pályája a termoszféra és az exoszféra alsó határai között, különböző sűrűségű rétegeken vezetett át. Amelyek paraméterei nem csupán a pályamagasság, de a műhold helyzete szerint is változtak, és amire az űridőjárásnak is volt hatása. Perigeuma közelében főképpen az atmoszférikus, apogeumánál viszont az árapály súrlódás hatása vélhető mértékadó. Léteznie kell tehát olyan helyzetének, magasságának, melyben a két hatás azonos nagyságrendű. A földközeli műholdpályák vizsgálata csak e két hatás (és más lehetséges tényezők) komplex vizsgálata által - a jelenleginél megfelelőbb eszközök, és nagyobb munka ráfordításával tehető teljesebbé.

Megjegyzendő, hogy a cubesatok süllyedési sebessége közötti, esetenként jelentős eltérések nem minden esetben magyarázhatók pusztán az ellenállás tényezőjük (C_D), vagy a felület- tömeg (A/m) arányuk különbségeivel. E kérdés megválaszolásához további összehasonlító elemzésük szükséges.

4. Az árapályról általában

Az árapály *erőtani* (statikus), és *energetikai* (dinamikus)¹ megnyilvánulásai mindenütt megmutatkoznak, ahol csak tömegvonzás, és *valós*, fizikai tulajdonságokkal bíró testek vannak, hatásai pedig sokfélék:

- égitestek széthullása (Roche sugár), törése, megolvadása, szétvetődése
- távolodása, zuhanása, szinkron és egyéb különleges pályák kialakulása
- a pályáik hajlásszögének, alakjának, helyzetének, forgási, keringési periódus idejének változása

Az **árapály** a *valós anyagokkal* „jött a világra”, hogy a mai napig, és a jövőben is az univerzum, az égitestek alakítója, pályáik formálója legyen. Azonban hozzájárulásának mértéke az Univerzum kialakulásához összetettsége, vizsgálatának nehézségei miatt kevésbé értékelhető.

Feltehető például a kérdés: van-e kapcsolata azokkal a jelenségekkel, melyek jelenleg is elméleti fizikai, csillagászati, és kozmológiai kutatások tárgyát képezik: sötét anyag- energia, a galaxisok rotációs sebesség [13], az űrszondák flyby anomáliáira [2;12], a Naprendszer bolygói pályáinak alakítására [15;16], a Hubble törvényre, az Univerzum (?) tágulására [14]? Ha már a Hold távolodásáról tudható, hogy arra igen? Vajon minden levezethető csupán néhány alapképletből, az Univerzum égitestjeinek *egyedisége*, sokfélesége figyelmen kívül hagyásával?

A hasonló kérdések azonban válasz nélkül kell, hogy maradjanak, sőt fel sem merülhetnek mindaddig, amíg nem állnak rendelkezésre kellő pontosságú csillagászati árapály észlelési adatok. Amelyekre azonban a csillagvilágban millió- milliárd éveket lehet várni...

A műholdpályák viszont alkalmas kismintái a hasonló kutatásoknak, mivel változásaik emberi- időlépték alatt is jól láthatóak. Így ha kellően általános elméleti alapok állnak rendelkezésre, hitelesebb számítások végezhetők nagyobb (vagy akármilyen kisebb) terjedelmű testek, azok csoportjai vonatkozásában is.

A műholdpályák paramétereinek (távolság, hajlásszög, periódusidő) változásai az *árapály* – *energetika* tárgykörébe sorolhatók. Aminek megismerése, és alkalmazása ugyanúgy mérnöki feladat, mint valamely árapály erőmű létesítése, rakéták, műholdak tervezése, létrehozása, és a pályára állítása. Kezdődik a probléma megfogalmazásával, folytatódik a megoldásával, és végül kísérleti ellenőrzésével.

¹ Az „árapály energetika” teljesebben jellemzi a lejátszódó folyamatokat, pl. melegedést, mint az „árapály dinamika”.

Az árapálllyal egyébként is többnyire alkalmazott és mérnöki tudományok- geofizika [5;6], tengerhajózás [9], energetika stb. foglalkoznak- mindegyikük a saját célkitűzésének, sajátosságának megfelelően.

Úgy tűnhet, hogy éppen csak a csillagászatnak nincs rá alkalmas metodikája, miközben a legnagyobb szüksége van rá? Hiszen még egy égitest árapálya is nehezen számítható „dagály dudorokkal”, akkor hogyan lehetne elemezni valamely galaxis, vagy az egész Univerzum árapály jelenségeit, csillagok, bolygók, űrszondák pályáinak változását?

Tudható, hogy a Kepler törvények maradéktalanul teljesülnek, ha az égitesteket fizikai tulajdonságok nélküli „elméleti” tömegpontként tekintjük. Ami az égi mechanika a csillagászati kutatások és az űrhajózás sikereinek alapja.

Azonban más vizsgálati metodika szükséges ahhoz, hogy a Naprendszer bolygóinak, valamely galaxis megszámlálhatatlan csillagának árapály távolodása, vagy az űrszondák hintamanőverei „méretezhető” legyenek! Olyanra, amelyben az égitestek egyedi tulajdonságokkal bírnak, külső hatásra eltérő választ adhatnak, azonban mindegyiküket mégsem kell külön- külön kiszámítani, megnehezítve, sőt- ellehetetlenítve a feladat megoldását!

Mert a testek az árapályra sokféleképpen reagálhatnak: a legkülönbözőbb folyamatok, deformáció, melegedés, olvadás, törés, forgásváltozás, helyzetük és pálya paramétereik monoton változása, oszcillációja történhetnek.

Az utóbbiak éppen a kisméretű és tömegű műholdak megfigyelése útján tanulmányozhatók leginkább. A MASAT-1 küldetése e tekintetben is nagyon tanulságos volt.

4.1 Árapály vizsgálati viszonylatok

A következőkben csak a tömegvonzás okozta csillagászati „*árapály*” -ről lesz szó, melynek vizsgálata két test, vagy csoportjaik között, különböző *viszonylatuk* feltételezésével végezhető. Adott viszonylatban mindig valamely „*távolinak*” minősülő test árapálya vizsgálható a „*központin*”, ami elszenvedti azt.

Amíg azonban a távolinak csupán pályája módosul, a központiban strukturális változások is történhetnek! Belátható, hogy a kétféle minősítés nem egyenértékű, másféle hatást és ellenhatást feltételez. Emiatt a folyamatban résztvevő testek szerepe szintén eltérő, tulajdonságaik, fizikai, és pálya paramétereik *egyediek*, külön vizsgálandók!

- A **távoli** test, ha kellő távolságra van a központtól, tömegpontnak tekinthető, mivel a vizsgálatban csupán a tömegvonzása által keltett vektormező szerepel. (Részenként történő vizsgálata akkor válhat szükségessé, ha egymáshoz közeli, terjedelmük és tömegük is összemérhető).

Távoli testként a földközeli műholdak is tömegpontnak tekinthetők, így ebben a viszonylatban csak tömegük (m_T) ismeretére van szükség. (Más jellegű, pl. atmoszférikus ellenállás vizsgálatokhoz természetesen egyéb geometriai és fizikai adataikra is szükség lehet.)

- A **központi** test viszont minden esetben **valós**- strukturált, alakja, méretei, és belső kölcsönkapcsolatait jellemező fizikai tulajdonságai vannak. A további vizsgálatokban központi testként a Föld szerepel.

Viszonylatuk azonban felcserélhető, sőt a vizsgálat teljessé tételéhez esetenként fel is cserélendő, mert eredő hatásuk csak úgy állapítható meg.

Gyakran előfordul, hogy egyikük, vagy mindkettőjük árapálya energetikailag elhanyagolható. Azonban sok esetben a számításokkal meg nem alapozott feltételezés megtévesztő lehet!

Gondolható például, hogy mert a műholdaknak kis mérete, tömege, és szilárd szerkezete van, az árapálynak egyáltalán nincs rájuk hatása? A feltevés valóban igaz arra a viszonylatra, amelyben a Föld a távoli, a műhold pedig központi test szerepét tölti be, a fordítottjára azonban nem! Ugyanis ha a műhold minősül távolinak, a Föld tömegében keltett árapálya saját pályaparamétereit jelentősen befolyásolhatja - a végzett mérések ezt igazolják!

Mert távoliként akár egy porszemnek a Napban keltett árapálya is okozhatja, hogy helyzetétől függően közeledjen, vagy hogy távolodjon, ahogyan az csillagászati léptékű jelenségekben tapasztalható is.

A tárgykör egyes részei (például pályaszámítások) a szakirodalomból megismerhetők, más részüket viszont még nem befejezett- további elméleti és kísérleti vizsgálatokat igényel.

5. Földközeli műholdpályák elméleti vizsgálata

A földkéreg deformációját [4;5], és tengerjárást [8] (**ár- apályt**) okozó tényezőként leggyakrabban a Hold, és a Nap **tömegvonzását**, továbbá a **centrifugális gyorsulást** említik.

A földhöz közeli pályán keringő műholdak azonban eltérő megközelítést igényelnek:

- Centrifugális gyorsulást a testek közös súlyponti tengelye (bari centrum) körüli keringésük kelt, ami ez esetben elhanyagolható, mivel közös súlypontjuk a Föld középpontjában van.

- A műholdak tömegvonzása azonban, ugyanúgy ahogyan a Napé, vagy a Holdé, a Földön *dagálykeltő erőként* (nyomatékként) jelentkezik. A továbbiakban „**árapály**” megnevezés alatt feltételesen² ez a tényező értendő.

A műhold árapálya a Föld elemi részecskéi szintjéig osztódva egész tömegét érinti, és energia disszipáció révén munkát végez benne. Aminek ugyan elhanyagolható hatása van a földbelső és a felszín fizikai állapotára, *tulajdon pályaparamétereit viszont jelentősen befolyásolhatja!*

Az előző felsorolás is érzékelteti, hogy a műhold- Föld árapály kapcsolat semmivel sem egyszerűbb, mint például a Holdé, vagy a Napé. Olyan, általános metodikára van tehát szükség, ami a sokféle hatást együtt veszi figyelembe, másfelől a számításokat, kísérleti adatok feldolgozását megkönnyítő *hasonlósági vizsgálatokban* is jól alkalmazható!

A továbbiakban ilyen módszer vázlatos ismertetésére, és kísérleti ellenőrzésére történik próbálkozás, elsőként a többi, földközeli szintén jelentős hatás (mint például az atmoszférikus ellenállás) elkülönítésével, vagy figyelmen kívül hagyásával.

A földközeli műholdpályák továbbiakban ismertetett árapály energetikai elmélete még nem befejezett- alapjainak tisztázása, modellezése történik, a mérési program során ellenőrizhetően. Ugyanakkor alkalmazása már jelenleg is szükséges és hasznos a mérési eredmények értékelésében, a kísérleti program tervezésében.

A vizsgálat során kínálóznak csillagászati párhuzamok, amelyek említése segítheti a folyamat megértését, érzékeltetve az árapály, mint kutatási terület aktualitását a modern fizika mellett.

5.1 Földközeli műholdpályák árapály- geometriai modellezése

A 7. ábrán a földközeli műholdpályák árapály-geometriai modellje látható, a szerző jelöléseivel. Melyben a szakirodalomban található, nagy távolságú objektumokra (pl. Hold- Föld) vonatkozó modellektől eltérően a vizsgált pont nem a központi test felszínén, hanem a belsejében lett felvéve, hangsúlyozva, hogy a távoli test árapálya minden pontján eltérően hat, s így eredőjük csak elemi hatásaik összegeként határozható meg. Ami megnehezíti az elméleti elemzést, elhanyagolása viszont az eredmények pontosságát csökkenti.

5.1.1 A geometriai vizsgálat változói, különleges helyei

A geometriai vizsgálatban előzetesen ismertnek csak a feltételezeten gömb alakú *központi test sugara*³ (R_{KF}),⁴ valamint a testek tömegközéppontjai közötti, *tengelytávolság* tekinthetők (R_{TK}). (Műholdak pályavizsgálatakor, *vezérsugárként* ez is változó paraméter).

² Ideiglenes terminológia- a végleges metodikához kell majd igazodjon

³ A továbbiakban adott vastagbetűs elnevezések feltételesek, erre a közleményre vonatkoznak.

⁴ (Indexelésnél K= központi, vagyis a Föld, T= távoli, vagyis a műhold)

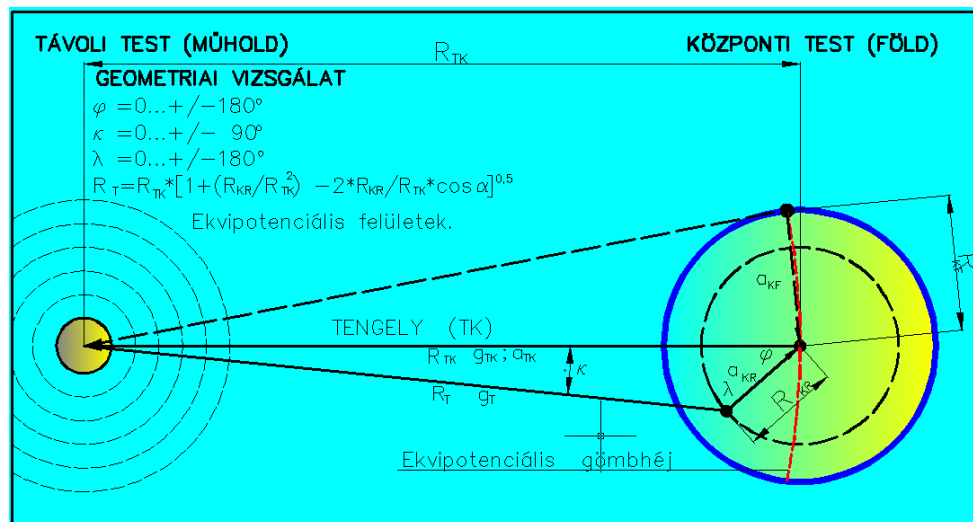
A felvehető *független változók* a következők:

- R_{KR} ... (m) **radiális távolság**- a központi test vizsgált, és tömegközép pontját összekötő, lokális zenit irányú távolság

- $\varphi = 0/+/-180$...(fok) **zenitszög**, a tengelyvonal és a radiális távolság közötti **szög**

A többi szükséges geometriai adat ezekből számítható. Például a távoli test középpontjának távolsága a központi test vizsgált pontjától (R_T ; **összekötő** távolság) a koszinusz tételből adódik:

$$R_T = (R_{KR}^2 - 2 * R_{KR} * R_{TK} * \cos \varphi + R_{TK}^2)^{1/2} \quad m \quad /2$$



7. ábra Műholdpálya geometriai modell

A geometriai modellen látható, és a fizikai modell részét is képező szögek a következők

... $\varphi = 0/+/-180$...(fok) **zenitszög**, a tengely és a radiális távolság közötti szög (0 értéke a testek között)

... $\kappa = 0/+/- 90$...(fok) **befogási szög**, a tengely, és az összekötő távolság közötti szög (0 értéke a tengelyen)

... $\lambda = 0/+/-180$...(fok) **nyílás szög**, a tengely és radiális távolság közötti szög (0 értéke az összekötőn)

... $\eta = 0 \dots 360$...(fok) **főköri szög**, a vizsgált pont helyzete a főkör síkjában (0 értéke fizikai vizsgálatoknál a keringési síkra merőlegesen, jelenleg a hengersizimetria miatt irreleváns)

Fizikai (pálya) vizsgálatoknál további szögek is definiálhatók.

A geometriai modell különleges pontjai, és szögei, mint kritériumok, a fizikai modellhez kapcsolódnak (5.5 fejezet), itt csak említésük történik.

1. $R_0=1,5\dots2,5 R_{KF}\dots m$ **Roche** törési határ a központi test középpontjától bármely irányban, amelyen belül a távoli test széthullása következhet be.
2. $ST\dots m$ **Stacioner Távolságú** pálya a központi test középpontjától bármely irányban, ahol az árapály munka nem okoz távolság változást (pl. geoszinkron pálya)
3. $R_{KRkrit} \dots m$ A központi test azon belső kritikus sugara, ahol az árapály okozta feszültség miatt a rétegek megfolyása, csúszása, következhet be. Ami a feltételezés szerint geofizikai jelentésű, jelenleg nem részletezett tulajdonság.
4. $\varphi_{krit}\dots fok \dots$ A központi test azon kritikus zenitszöge, ahol az ekvipotenciális felület a központi test felületét metszi. (a **fizikai főkör** helye, a valóságos ár-apály határa)

Más szempontok alapján további kritériumok definiálhatók.

Mivel a vizsgált jelenségek főtengety- szimmetrikusak, a geometriai modell a központi test egész tömegére értelmezhető. A távoli Hold, vagy egy közeli porszem árapály a Föld minden pontjára külön- külön hat! *Emiatt nem tekinthető teljesnek az olyan vizsgálat, ami csupán a felszíni pontokat veszi figyelembe!*

5.1.2 A geometriai modell dimenzió nélküli formában

A geometriai modellt dimenzió nélküli arányszámként felírva a célul kitűzött hasonlósági vizsgálatok követelményei elégíthetők ki:

$$\bar{R}_T = (\bar{R}_{KR}^2 * \bar{R}_{KF}^2 - 2 * \bar{R}_{KR} * \bar{R}_{KF} * \cos \varphi + 1)^{1/2} \quad - \quad /3$$

Ahol:

$\bar{R}_{KF} = R_{KF} / R_{TK} = 0\dots1,0 \dots$ *állandó*, a központi test (felületi) **sugár aránya** a tengelytávolsághoz (*pályavizsgálatok esetén változó*).

$\bar{R}_{KR} = R_{KR} / R_{KF} = 0\dots1,0 \dots$ *független változó*, ami a központi test vizsgált pontjának **radiális** távolság **aránya** a felületi sugárhoz.

$$\bar{R}_T = R_T / R_{TK} = 1 \pm \bar{R}_{KF} = 0\dots2,0 \quad \text{függő változó, az } \underline{\text{összekötő}} \text{ és a tengelytávolság } \underline{\text{aránya}}.$$

A geometriai vizsgálatnak tehát végül csak két független változója van,- a vizsgált pont radiális aránya (\bar{R}_{KR}), és zenitszöge (φ). Melyek kizárólag a központi test jellemzői, s így az azonos struktúrájú (gázbolygó, csillag, szilárd és amorf) égitestek hasonlósági vizsgálata általuk megalapozható.

Földközeli műholdak ($\bar{R}_{KF} \sim 1$) esetében további egyszerűsítés lehetséges:

$$\bar{R}_T \approx (\bar{R}_{KR}^2 - 2 * \bar{R}_{KR} * \cos \varphi + 1)^{1/2} \quad - \quad / .4$$

A közelítő képlettel számolt gravitációs potenciál, vagy gyorsulásvektor hibája közvetlenül a központi test felszínén és a végtelenben minden $\varphi > 0$ zenitszögnél 0%.

Emiatt valamely kis tömegű testnek egy nagyságrendekkel nagyobb méretű és tömegű másik test közelében történő keringésekor (márpedig a cubesatokra pontosan ez jellemző) az egymástól nagy távolságra lévő égitestekre kidolgozott árapály módszerek alkalmazását semmi nem indokolja!

Aminek egyébként a legnagyobb jelentősége a kozmológiában van, amikor valamely Földtől távoli csillag árapály mozgását kell a **köztük lévő tér összes tömege** figyelembevételével vizsgálni! Ez esetben a köztes tér (mint központi test) árapály munkája is lehet olyan tényező, ami a távoli égitestek távolsággal növekvő távolodási sebességét okozhatja, a Hubble törvénynek megfelelően!

Magának az Univerzumnak, ahogyan bármely forgó égitestnek, szintén lehet ST kritérium sugara (lásd 5.5 fejezet), melyen túl a testeket távolítja magától, miközben térfoglalása nő, a saját forgási energiája és forgási impulzusa csökken.

Az ajánlott közelítő képlet emellett lehetővé teszi az azonos típusú központi testek tengelytávolságtól (R_{TK}) független csoportosítását, azt követően pedig hasonlósági összefüggésekkel, kevésszámú, az adott csoportra elméletileg, vagy kísérleti úton meghatározható fizikai paraméterekkel (lásd „árapály csatolási tényező” Φ) történő jellemzését. Ami megkönnyítheti a valóságos égitestek, azok halmazai elméleti, és kísérleti árapály vizsgálatait.

Az *árapály energetika* mint elméleti csillagászati tárgy, nem tűnik befejezettnek. Egyre jobban látható, hogy nem helyettesíthető a gyakrabban hivatkozott árapály erővel, sem egyéb perturbációkkal: az atmoszférikus ellenállással, a Föld lapultságából származtatott zonális harmonikus (J_2), és luni-szoláris hatásokkal, sugárnyomással, netán más, modern fizikai elméletekkel.

Az árapály energetika a klasszikus fizika ma is ígéretes elméleti ága!

5.1.3 Ekvipotenciális gömbhéj a központi testben

Az árapály jelenségekben a központi testnek egy, a geometriai modellben (7. ábra) látható gömbhéja is szerepet játszik. Ami ugyan a műholdakat kevéssé érinti, mivel azok központi testként ritkán vizsgálándók, a teljesség kedvéért mégis ismertetésre kerül.

*Az „**ekvipotenciális (semleges) gömbhéj**” a központi test középpontján át (R_{TK}) sugárral rajzolt gömbfelület, melyen a távoli test gyorsulás vektorai azonos értékűek (ekvipotenciálisak)-megegyeznek a központi égitestre tömegpontként számítottal.*

Ami azt jelenti, hogy bármely pontján csak radiális irányú árapály gyorsulási összetevője van, a tengelyirányú nulla értékű ($a_{TK}=0$).

A központi test középponti, tengelyre merőleges síkját érintő (*geometriai*) *főkörtől* eltérően, a távolihoz közelebb, külön definiálható az ekvipotenciális gömbhéj metszövonalala: a „*fizikai főkör*”, mint valóságos ár- apály határ.

A fizikai főkör két oldalán ugyanis ellentétes irányú, a tőle való távolsággal növekvő tengelyirányú árapály gyorsulási vektor összetevők ébrednek (lásd fizikai modell, 8.b ábra) Ami a központi test deformációjához, meghatározott feltételek esetén pedig, valamely módosult semleges gömbhéj mentén a nagyobb tömegű test Roche sugarán belüli szakadásához vezet.

Az ekvipotenciális gömbhéj a *központi* testet (V_K , m^3) két, nem egyenlő térfogatú (tömegű) részre bontja. A *testek közötti* (V_1) rész mindig kisebb, mint a másik (V_2). Nem érdektelen a közeli és távoli részek térfogataránya, ami a középponti távolság aránytól (\bar{R}_{KF}) függ:

$$\bar{V} = V_1/V_K = (1 - 0,375 * \bar{R}_{KF}) / 2 \quad - \quad /5$$

A két test közötti rész térfogataránya:

- ha a távoli test a *központi felületén van* ($\bar{R}_{KF}=1,000$; $\varphi_{Fkrit}=60^\circ$): $\bar{V} = 0,3125$
- ha a távoli test a *Roche határhoz közeli* ($\bar{R}_{KF}\sim 0,400$; $\varphi_{Fkrit}\sim 75^\circ$): $\bar{V} = 0,4250$
- ha a távoli test a *Hold pályáján van* ($\bar{R}_{KF}\sim 0,017$; $\varphi_{Fkrit}\sim 89^\circ$): $\bar{V} = 0,4970$
- ha a távoli test a *végtelenben van* ($\bar{R}_{KF}=0,000$; $\varphi_{Fkrit}=90^\circ$): $\bar{V} = 0,5000$

Itt $\varphi_{Fkrit} = \arccos(R_{KR}/R_{TK})$ kritikus zenitszög, ahol az ekvipotenciális felület érinti a Föld felszínét (a fizikai főkör szöge)

Nagy távolságból azonban a távoli test árapálya már nem képes a központit szétszakítani. A Roche sugár kritériumból (R_o) számítva törés csak kis távolságuk ($\bar{R}_{KF} > 1/R_o \sim 0,4$) esetén léphet fel- amit a testek sűrűség aránya, valamint szilárd, vagy folyadék állapota is befolyásolhat. Emiatt a közöttük kiszakadó térfogat a teljesnek legfeljebb 42...45 %, nagyobb része (55...58%) az ellentétes irányba kell, hogy szóródjon (lásd 6.1 fejezet)

A Roche sugár gyorsulási vektorok egyenlegétől függő, *árapály erőtan* –kritérium. Általánossága azonban megkérdőjelezhető, mivel az árapálynak más olyan, *energetikai* hatásai is lehetségesek, amelyek közeli pályájuk esetén, vele együtt okozhatják a központi test hasonló sérüléseit. (Lásd ST kritérium pálya, 5.5 fejezet, valamint 6.1 fejezet.)

5.2 Földközeli műholdpályák fizikai modellezése

A csillagászati és űrhajózási objektumok *árapály miatti pályaváltozásainak* vizsgálata két fő részre osztható:

- Elsőként a távoli test árapály potenciálja által a központi testen végzett munkát (W_A) kell elméleti úton meghatározni, ami annak szerkezeti adottságaitól, és a pályaparaméterektől függ.

(A továbbiakban ennek vázlatos elméleti ismertetése történik).

- Azt követően vizsgálható pályaelemeik (távolságuk, hajlásszögük, excentricitásuk stb.) monoton változása, ingadozása. (A közlemény csak a kísérleti vizsgálatok eredményeit mutatja be.)

5.3 Az árapály munka meghatározása

Elsőként a földközeli műhold tömegvonzási gyorsulási vektora számítandó ki a Föld vizsgált pontjában, a közelítő képlet (.4) felhasználásával.

$$\mathbf{g}_T \approx \mathbf{g}_{TK} / (\bar{R}_{KR}^2 - 2 * \bar{R}_{KR} * \cos \varphi + 1) \quad \text{m/s}^2 \quad /.6$$

ahol a távoli test tömegvonzási gyorsulás vektora a központi test tömegközéppontjában.

$$\mathbf{g}_{TK} = \mathbf{g}_T - \gamma * m_T / \bar{R}_{TK}^2 \quad \text{m/s}^2 \quad /.7$$

Illetve átírva azt a központi test általánosabban ismert felületi gyorsulására

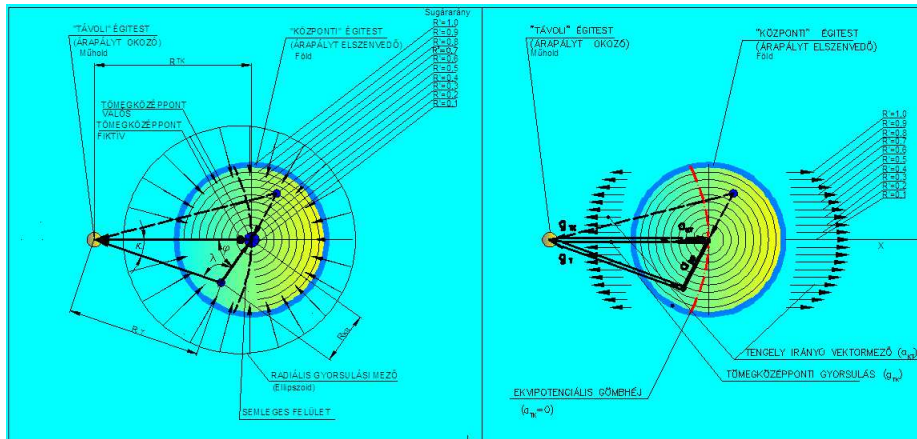
$$\mathbf{g}_{TK} = \mathbf{g}_{KF} * m_T / m_K * (R_{KF} / R_T)^2 \quad \text{m/s}^2 \quad /.7$$

Itt γ ...gravitációs állandó

Előbbi összefüggés a központi test bármely pontjára értelmezhető, kivéve azt a szituációt és pontot ($R_{KR}=R_{KF}=R_{KT}$; $\varphi=0$), ahol a távoli test éppen érinti a központi felszínét, s így valójában a vizsgált ponttal azonos.

A földközeli műholdak közelítő képletében csak a radiális sugárány, és a zenit szög szerepel, érzékeltetve, hogy a folyamatban a Föld minden pontja részt vesz.

Az adott pont tömegvonzási gyorsulás vektora (\mathbf{g}_T) *radiális* (\mathbf{a}_{KR}) és *tengely* irányú (\mathbf{a}_{KT}) összetevőkre bontható, melyek árapály nyomatókot keltve, és munkát végezve a központi testben ébredő árapály erőtan (statikus), és energetikai (dinamikus) jelenségek közvetlen okai.



8a;b ábrák: A távoli égitest tömegvonzása által keltett radiális és tengelyirányú vektormező

A vizsgált pontok gyorsulási összetevőinek ismeretében a rájuk ható elemi radiális és tengelyirányú erők, és az általuk keltett nyomatékok kiszámíthatók. A központi testben végzett árapály munka azok összegzése (integrálása) útján számítható, ami a feltételezett, hengersizmetrikus szituációban a főköri szög (η) változóként történő figyelembevétele nélkül is lehetséges.

A jelen közleményben az árapály munka meghatározására az előtanulmányok során kidolgozott összefüggések láthatók, a későbbi, hasonlósági pályaszámításokban általánosan ismerhető paraméterekkel (m_T ; $\mathbf{g}_{KF}(\pm\Delta n)$, Φ , R_{KF} ; R_T ; \mathbf{R}_{TK})

5.3.1 A radiális gyorsulási vektor, és árapály nyomaték munkavégzése

Statikus állapotban a **radiális gyorsulási vektorok** (lásd 8/a. ábra) a központi test adott pontján egyfajta fiktív tömegként adódnak hozzá annak saját tömegvonzásához. Az árapály ezáltal a központi test saját fizikai állapotát is módosítja.

Módosult vektormezője ellipszoid jellegű, melynek szimmetria középpontja a távoli test felé tolódik el (fiktív tömegközéppont), és amelyben a radiális gyorsulási vektor- összetevők a műhold felőli oldalon nagyobbak- egyenlegük a távolabbi oldal felé mutat. A radiális gyorsulási vektormező tehát statikus állapotban is képes dagály-dombokat kelteni a műholddal ellentétes oldalon, illetve apályt a tengelyre merőleges főkör mentén, nyomást gyakorolva rá. Amihez a Hold esetében a bari centrum körüli keringésük okozta centrifugális gyorsulás csak hozzáadódik.

Dinamikus állapotban viszont, ha a testek relatív szögelfordulása, elmozdulása is történik, árapály energetikai jelenségek játszódnak le! Mert a radiális gyorsulási vektor nem kötődik a vizsgált ponthoz, elmozdulásakor az adott réteg súrlódási tényezőjével (μ_{KR}) arányos, disszipatív nyíró erő

(\mathbf{F}), a sugárral arányos nyomaték, és a relatív elfordulások számával ($\pm\Delta n$) arányos munka ($\pm dW_{\text{Krad}}$) keletkezik, ami gömbövenként a központi test egészére összegezhető ($\pm W_{\text{Krad}}$)

A testek relatív szögelfordulása során a radiális gyorsulási vektor által a központi testen végzett előjeles árapály munka:

$$\pm W_{\text{Krad}} = \pm \Delta n * \Phi_{\text{Rad}} * \bar{R}_{\text{KF}}^3 * m_{\text{T}} * U_{\text{KF}} \quad \text{J} \quad /.8$$

Ahol $U_{\text{KF}} = \mathbf{g}_{\text{KF}} * \mathbf{R}_{\text{KF}} \dots \text{m}^2/\text{s}^2 \dots$ a központi test felszíni gravitációs potenciálja

A radiális árapály csatolási tényező (Φ_{Rad} , lásd 0 fejezet) a szituációra jellemző geometriai és fizikai paraméterekből, a hengersizmetria miatt kettős integrálként adódik, vagy mérhető.

$$\Phi_{\text{Rad}} = \int^R \int^\pi f(\bar{R}_{\text{KR}}; \mu_{\text{KR}}; \rho_{\text{KR}}; \varphi) * d\varphi * d\bar{R}_{\text{KR}} \quad - \quad /.9$$

A radiális gyorsulási vektor által a központi testen végzett árapály munka egyenesen arányos a tömegével (m_{T}), a központi test eredő árapály csatolási (disszipációs) tényezőjével (Φ_{Rad}) relatív elfordulásaik ($\pm\Delta n$) számával, és a központi test felszíni gravitációs potenciáljával (U_{KF})

Ebben a képletben minden változó csillagászati vizsgálatok alapján ismert lehet, kivéve az árapály csatolási tényezőt, ami viszont mérésekkel meghatározható.

5.3.2 A tengelyirányú gyorsulási vektor hatása

Statikus állapotban a **tengelyirányú gyorsulási vektorok** (lásd 8/b. ábra) maguk is két:

- tengelyirányú **középponti** gyorsulás... \mathbf{g}_{TK}
- tengelyirányú **árapály** gyorsulás ... $\Delta \mathbf{a}_{\text{TÁ}}$

összetevőre bonthatók, melyek iránya azonos, vagy ellentétes lehet.

$$\mathbf{a}_{\text{TK}} = \mathbf{g}_{\text{TK}} \pm \Delta \mathbf{a}_{\text{TÁ}} \quad \text{m/s}^2 \quad /.10$$

A **tengelyirányú középponti gyorsulási összetevő** (\mathbf{g}_{TK}) az árapály vizsgálat szempontjából irreleváns- valójában az egész központi test egységes, tömegponti vonzását fejezi ki a bari centrum körüli keringéséből származó centrifugális erővel szemben.

A továbbiakban csak a semleges felülettel elválasztott, ellentétes előjelű, tengelyirányú árapály gyorsulási vektormezőről lesz szó, ami a testet mindenütt összetartó radiális ellenében, helyenként azt is meghaladva szintén elősegítheti a dagálydombok kialakulását, sőt- a testek kritikus Roche sugarán belül szét is szakíthatja azt! (A Roche sugár- kritérium ilyen szemlélettel is közelíthető...)

Mint ahogy a kifelé mutató tengelyirányú gyorsulási vektorok az ellentétes oldalon nagyobbak, okozhatják ott dagály-dombok kialakulását, a merőleges főkör mentén pedig az óceán apályát. (Amihez a Hold esetében természetesen a bari centrum körüli forgása okozta centrifugális gyorsulás is hozzáadódhat)

Dinamikus állapotban a tengely irányú gyorsulási vektorok sem követik a vizsgált pont elfordulását, ami rugalmatlan deformációjuk, rétegeik elcsúszása miatt ugyanúgy nyíró erő ébredésével, energia disszipációval jár, kiszámításának módja, képlete is hasonló.

A gömbövíz elfordulása során a tengelyirányú gyorsulási vektor által a központi testen végzett árapály munka:

$$\pm W_{KTeng} = \pm \Delta n * \Phi_{Ten} * \bar{R}_{KF}^3 * m_T * U_{KF} \quad J \quad / .11$$

A tengelyirányú gyorsulási vektor által a központi testen végzett árapály munka egyenesen arányos a tömegével (m_T), a központi test eredő árapály csatolási (disszipációs) tényezőjével (Φ_{Ten}) relatív elfordulásaik ($\pm \Delta n$) számával, és a központi test felszíni gravitációs potenciáljával (U_{KF})

5.3.3 Árapály csatolási tényező (Φ) és árapály munka

A cél valamely, a jelenleginél általánosabb, hasonlósági elven alapuló eljárás kidolgozása. Aminek létrehozására az a körülmény ad lehetőséget, hogy bár a távoli test árapály nyomatéka a központiban sokféleképpen bontódhat le, végül azonban ugyanazon formában (jellemzően melegeként) alakul árapály- munkává.

Elegendő tehát egyetlen olyan, az adott központi testre, vagy testek csoportjára jellemző energia disszipációs tényező bevezetése, ami a távoli test árapály potenciáljának bármely módon munkává történő alakulása arányát valamennyi lehetséges részfolyamata összegeként fejezi ki. Szükséges továbbá, hogy az elsődlegesen kísérleti úton meghatározható, és hasonlósági elv alapján azonos típusú égitestekre általánosítható legyen.

Mivel a keresett tényező a gyorsulási vektor által keltett árapály potenciál valamely központi testhez való kapcsolódásának arányszáma, a továbbiakban feltételelesen **árapály csatolási tényezőként** ($\Phi=0...1,0$) lesz említve.

Így, ha valamely távoli test árapály gyorsulási vektora, és a központi test **árapály csatolási tényezője** ismert, a rajta végzett árapály munka, és annak hatása a pálya paraméterek változására kiszámítható.

Az eddigi vizsgálatok alapján a távoli test által a központi testben keltett összes árapály munka (W_A) a radiális, és tengelyirányú összetevők összege:

$$\pm W_A = \pm W_{Krad} + \pm W_{KTeng} = \pm \Delta n * \Phi * \bar{R}_{KF}^3 * m_T * U_{KF} \quad J \quad /.12$$

Ahol $U_{KF} = g_{KF} * R_{KF} \dots m^2/s^2 \dots$ a központi test felszíni gravitációs potenciálja

A távoli test vonzása által keltett árapály munka egyenesen arányos a tömegével (m_T), a központi test eredő árapály csatolási (disszipációs) tényezőjével (Φ) relatív elfordulásai ($\pm \Delta n$) számával, és a központi test felszíni gravitációs potenciáljával (U_{KF}).

Az árapálymunka időben, és a távolsággal is előjelesen változik, ami az univerzum bármely központú, és tömegű térségére érvényes, feltételezhetően a Hubble törvényhez is kapcsolódó kozmológiai tényező.

A távolodási sebesség az erő taggal osztva adódik

$$V_T = \pm \Delta n * \Phi * \bar{R}_{KF} * \underline{R}_{KF} \quad m \quad /.13$$

Mivel relatív elfordulásuk az ST kritériumtól függően pozitív, vagy negatív előjelű is lehet, az árapály munka csökkentheti, vagy növelheti a központi test forgási, és megfordítva- a távoli test keringési energiáját, nagytengelyének hosszát.

Kivéve, ha $\Delta n = 0$, amikor árapály munkavégzés nem történik (stacionárius pálya).

Az eredő árapály csatolási tényező (Φ) képletébe a ($\pm \Delta \Phi$) tag bevezetését az indokolja, hogy a disszipációt a gyorsulási vektoron kívül valójában még sokféle, pl. magneto- hidrodinamikus, és egyéb folyamat is befolyásolhatja. (Az atmoszférikus ellenállást másképpen, és külön célszerű figyelembe venni).

$$\Phi = \Phi_{Rad} + \Phi_{Teng} \pm \Delta \Phi \quad - \quad /.14$$

Az eredő árapály csatolási tényező (Φ) a távoli test árapály potenciáljának energia disszipáció révén a központiban munkává alakuló hányadát kifejező, azonos típusú égitestek hasonlósági vizsgálata során együttthatóként használható, jellemzően kísérleti úton meghatározható arányszám.

Radiális, tengelyirányú, és egyéb összetevőinek aránya, és mértéke a testek geometriai és fizikai paramétereinek függvényében változhatnak. Nagyobb mértékű változásoknak a földközeli műholdpályák vannak kitéve, mivel ott olyan összetett árapály folyamatokhoz kapcsolódnak, melyekben a Föld, mint központi test deformációja, rétegeinek elcsúszása, vízjárásának, légkörének sűrűsödése, és még sokféle fizikai tényezőnek szélsőségesen változó, mértékadó szerepe van. Ami távolabb, a középponti távolságarány (\bar{R}_{KF}) növekedésével a Hold távolságáig gyorsan lecsökken.

Az árapály csatolási tényező nem csupán a Földre, hanem minden tömeggel bíró testre értelmezhető. Égitestek vonatkozásában azonban csak kevés számú olyan pontosságú mérési adat van, amiből árapály csatolási tényezőjük meghatározható.

Kivéve a Holdat, aminek távolodása pontosabban mérhető (~38...45 mm/év). Ebből a **Föld** árapály csatolási tényezője: $\sim\Phi=1,1E-9$):

$$V_T = 1,1E-9 * (365,24 - 13,36) * (6371/384000) * 6,371E+6 = 0,041 \quad \text{m/év} \quad /.15$$

Amihez a Hold 8,12 E+18 J, a Nap 3,71 E+18 J, összesen 1,18 E+19 J éves árapály munkája tartozik a Földön, ami megfelel a szakirodalomban olvashatónak.

Hasonló értéke lehet a távoli egyenlítői műhold pályáknak is- ami a program során, az atmoszférán kívüli műholdaknál lesz ellenőrizhető.

A földközeli műholdak árapály csatolási tényezőjét azonban a pálya hajlásszögén és távolságán kívül a földbelső sűrűségeloszlása, a légkör, a vízjárás, és szilárd felszín is befolyásolhatja. Nagyságrendileg nagyobb atmoszférikus ellenállása miatt nem volt mód az ESA program műholdpályái árapály süllyedésének elkülönítésére.

Csupán becslése történhetett egy, az exoszféra alsó határán keringő, kisebb hajlásszögű (35 fok) műhold (1.11 jelű) ~3,0- m/d süllyedése alapján, amiből földközelpben nagyságrenddel nagyobb, $\Phi \sim 5 E-8$, árapály csatolási tényező becsülhető.

A földi tömegvonzás sajátosságainak kísérleti felmérése, eredményeinek hasznosítása már jóval az űrtechnika megjelenése előtt elkezdődött, és folytatódik ma is egyebek között. a műholdpályák elemzésével.

Szerző vizsgálatait 2012-ben, 25 db műholdpálya rendszeres figyelésével kezdte el. Közülük a hét cubesat már „visszatért”, közöttük a MASAT-1, melynek útjáról a legtöbb adat lett felvéve. Feldolgozásuk azonban összetett feladat, jelenleg csak a mérési eredmények kis részének bemutatása történhet.

A kutatás egyik célja olyan egyszerűsített, hasonlósági elvű metodika kidolgozása, ami lehetőséget nyújt adott műhold, vagy égitestpályák fajlagos (fordulatra, napra, vagy egységnyi tömegre vetített) árapály perturbációiknak meghatározására..

Általánosan érvényes módszerre van szükség, aminek fontos eleme a központi test árapály csatolási tényezőjének (Φ) kísérleti, illetve lehetőség esetén elméleti meghatározása.

Végül ez adhat majd lehetőséget az égitestek árapály szerinti besorolására, és a szükséges számítások végzésére a galaxisok, peremcsillagai, űrszondák flyby anomáliái, a Hubble törvény, és más jelenségek teljesebb megértésében.

5.4 Az árapály munka hatása a földközeli műholdpályákra.

Előzőek alapján a távoli test árapálymunkája a központon olyan féktárcsához hasonlítható, aminek munkavégzése a szorító erőtől (nyomatéktól), a tengellyel való súrlódási tényezőjétől (μ), és relatív fordulataik számától ($\pm\Delta n$) függ.

- Ha a féktárcsa a tengelyhez rögzítve, azzal együtt forog, nem történik munkavégzés (szinkron pálya)
- Ha a féktárcsa helyzete fixált, akkor a munkavégzés csak melegítheti őket (az űrben nem reális szituáció).
- Ha a féktárcsa szabadon foroghat, a súrlódás a saját tehetetlenségével szemben gyorsulásra, vagy lassulásra készíti, szögsebesség különbségükkel (szlipjükkel) arányosan.

Az árapály munka végül az idővel (a fordulatok számával) is arányos.

Az árapály hatását azonban a testek között nem valamely merev rúd, hanem a gravitáció közvetíti. Emiatt a központi test által a műholdpályán okozott munka mechanizmusának szemléltetésére inkább egy ismert sportág: a *kalapácsvetés* kínálkozhat! Melyben a sportoló közös tömegpontjuk körül forgásba lendülve, a „*huzal*” segítségével hozza keringésbe a fémből készült „*fej*”. Ez esetben azonban nem a kettőjük gravitációja, hanem a centrifugális gyorsulásuk vizsgálendő:

- Ha a „fej” keringési szögsebessége kisebb, akkor az a sportoló forgásával felgyorsítva emelhető meg, és hajítható messze. Ezt teszi a Föld is a Holddal, legfeljebb más eszközökkel- fogója az árapály nyomaték, huzala a gravitáció, a fej pedig maga a Hold- ami kezdő pályájától már százezer kilométerre „hajítódott”.
- Ha viszont a keringési szögsebesség nagyobb (forgását a sportoló fékezi) akkor önmaga hullik a Földre.
- Végül szögsebességük azonossága esetén a sportoló nem végez rajta munkát, ám az instabil állapot, különböző okok miatt könnyen megszűnhet.

A műholdak mozgása azonban árnyaltabb- keringési síkjuk szöge jelentősen eltérhet az ekvátorétól, ellipszis pályán pedig „huzalhosszúságuk” is változik.

A műholdpályák itt elemzett árapály elmélete összetett, még befejezetlen témakör. Egyes részei, például a pályaszámítások, a szakirodalomból [8./] is megismerhetők, más részük viszont további elméleti és kísérleti vizsgálatokat igényel.

A földközeli műholdpályák energiáját (E) befolyásoló perturbációk árapály munkavégzés egyenlege ($\pm\Delta W$) pozitív, negatív vagy nulla értékű lehet, növelve, csökkentve, vagy változás nélkül hagyva azt :

$$E = m_T * (\frac{1}{2} * v^2 - \gamma * m_K / R_{TK}) \pm \Delta W = - 0,5 * \gamma * m_T * m_K / a \pm \Delta W \quad J \quad /.14$$

Így felírva a műholdpálya energiája a félnagy tengelyétől függ, amit még a pályán végzett, annak perturbációját okozó pillanatnyi árapály, és egyéb hozzáadott munkák egyenlege (pozitív, negatív, vagy nulla szaldójú) befolyásolhat.

$$\pm\Delta W = \pm W_A \pm W_E \quad J \quad /.15$$

Ahol :

$v \dots m/s$ a műhold pillanatnyi sebessége

$W_A \dots$ Az árapály munkája

\dots Egyéb perturbációs munkák

A zavaró hatások közül legáltalánosabb az árapály munka (W_A), ami a legtöbb pályajellemzőt befolyásolhatja.

Az atmoszférikus súrlódás csak a földközeli műholdpályák energiájára hat, ott viszont hatása minden másénál nagyságrendekkel nagyobb - a műhold miatta gyorsulva lezuhan, vagy még a földfelszín előtt elég. Hatása azonban szelektív, a pálya más paramétereit, például a perigeum forgását, és ahhoz kapcsolódó egyéb jelenségeket, excentricitása, keringési periódusideje oszcillálását az atmoszférikus súrlódás csak közvetve érinti- azok egyértelműen árapály jelenségek.

Ha például $W_A = W_E = 0$ akkor a pálya paraméterek nem változnak (pl. szinkron pályák).

$\pm\Delta W = \pm W_A \pm W_E = 0$ esetén a pálya energiája ugyan nem, paramétereit azonban kiegyenlítően, monoton változhatnak, vagy oszcillálhatnak.

Emiatt érdek fűződik azon kritérium pályák meghatározására, melyeknél a műholdakra ható árapály, és atmoszférikus ellenállás azonos nagyságrendűek (5.5 fejezet). Mindez azonban a rendelkezésre álló adatokkal, és eszközökkel jelenleg nem volt kutatható.

5.5 Árapály- energetikai pálya kritériumok

Ebben a fejezetben próbálkozás történik új árapály energetikai pálya kritériumok bemutatására.

(Elnevezéseik feltételesek, nem azonosak a szakirodalommal)

Ismert *árapály- erőtani* kritérium a „*Roche sugár*” (...határ...,Ro), melyen belül valamely nagyobb tömegű égitest által keltett tengely irányú gyorsulási vektormező a központi testet szétszakítja. Természetesen ekkor a központi test kisebb szilárdsága, és közelségük feltételezhető.

Árapály- energetikai jelenségek vonatkozásában is többféle kritérium definiálható, melyek célja például valamely pályaparaméter állandósága feltételének megadása. (A továbbiakban az állandóságot a „Stacioner” előszó kezdőbetűje (S...) jelöli)

A „*napszinkron*” műholdpályák hajlásszögét (kvázipoláris, 80...100 fok), és magasságát (500-1500 km), elvárt élettartamuk figyelembevételével [11]) úgy választják meg, hogy pályasíkjuk Nappal bezárt szöge állandó legyen (ami **Pozíciótartási** kritérium- **SP**). Árapály okozta állandó szögelfordulásuk (átfordulásuk) így egész évben biztosítja napelemeik megfelelő besugárzását, és a megfigyelt terület kellő megvilágítását. Emellett retrográd keringésük esetén a hozzáadott árapály (W_A) munka növeli a pálya energiáját. Több ilyen műhold vizsgálata van folyamatban, például a Deimoszé (jelenleg süllyed.).

Az *állandó pályatávolságot* a közleményben feltételelesen **ST**- vel (**Stacioner Távolságú**) jelölt kritérium jellemzi, ami más hozzáadódó energiák hiányában állandó energiájú (**SE**) pályát is jelent. A Föld forgássíkjában, körpályán keringő műholdak vonatkozásában ezeket a feltételeket a még pozíciót is tartó geo stacionárius műholdpálya elégíti ki (**ST**; **SE**; **SP**).

A geo stacionárius pályán belüli műholdak árapálya a saját süllyedésüket (energiájuk csökkenését), kívül távolodásukat (energiájuk növekedését, lásd Hold) idézi elő.

Az **ST** pálya azonban nem valamely vonalszerű jelenségnek, hanem meghatározott kiterjedésű, és struktúrájú zónának képzelhető, melynek határait a központi égitest adottságai határozzák meg. Gázbolygók, csillagok öveinek differenciált forgása miatt **ST** pályájuk nagy távolságon terülhet, váltakozó tulajdonságú sávokkal, melyek a rajtuk keringő tömegeket csapdába ejthetik, távolíthatják, vagy süllyedésre készítetik.

A gázbolygók gyűrűinek rései is feltételezhetően ezzel magyarázhatók- a Cassini rés például éppen a Szaturnusz szinkronpálya- zónájában van, gyűrűi közötti távolság emiatt nőhet.

A Földön a Clarke műsorszóró- műhold pályák hajolhatnak el kis mértékben az egyenlítői síktól.

Az **ST** pályakritérium értéke a központi test tömegétől, és forgási periódusidejétől függ. A periódusidővel az **ST** is növekedik, hogy határhelyzetben (ha a központi test forgása teljesen megszűnik), a végtelenbe távolodva bármely távoli test közelítésére törekedjen. Ilyen szituáció

azonban többféle okból nem alakulhat ki. A távoli test süllyedésekor ugyanis a központi test forgása is felgyorsul, csökkentve saját ST pályakritériumát, lassítva a zuhanást. A Tejút központjában lévő Saggiárius „A” fekete lyukra végzett számítás a Napéhoz hasonló nagyságrendű, ST~20-30 Mkm kritérium távolságot eredményezett. Így nem csoda, ha a hozzá közelebbi zóna már teljesen kitisztult, és hogy a távolabbi testeket sem vonzza, hanem inkább távolítja!

Másfelől fordított viszonylatban, ha a másik test ST pályája közöttük helyezkedik el, adott esetben szintén távolodásukat okozhatja. Így hát az általánosított ST pálya egyfajta, a (központi) testeket jellemző „egyediségi határ”, ami megszabja a mellette haladó, körülötte keringő testek viszonyát közeledését, távolodását. Bármely tömeggel bíró test rendelkezik ilyen távoli taszító- vonzó tulajdonsággal!

A központi test forgássíkján, retrográd irányú körpályán keringő műhold (pl. OV1=2.2 jelű), ST pályakritériuma viszont mindig a földfelszínen van, mivel pályája bármely távolságban az árapály munka miatt energia nyereséges. Ami azonban nemcsak távolodását okozhatja, hanem pl. perigeum forgását is gyorsíthatja: az OV1 retrográd műhold ($i=145$ fok) periódusideje a legkisebbek közé tartozik (50 nap). Aminek szintén lehet csillagászati analógiája- hozzájárulhat a galaxisok peremcsillagai rotációs sebesség anomáliáihoz.

A direkt keringésű, távoli ellipszis, és ferde pályák esetében is- excentricitásuktól, hajlásszögüktől függően- az aktuális ST- n belüli és kívüli, direkt és retrográd irányú pályaszakaszok váltakozhatnak, melyek energia egyenlege egy fordulaton belül pozitív, negatív, vagy nullaszaldójú lehet. Ennek megfelelően változhat az életútjuk, pályaparamétereik: perigeumuk csökkenhet, miközben apogeumuk távolodik, majd a tendencia megfordulhat, hajlásszögük, excentricitásuk, nagytengelyük is oszcillálhat.

Az állandó távolság azonban nem jelent egyúttal energetikai inaktivitást, mert a központi test szinkronpályáján tartózkodó távolira, ha annak mérete kellően nagy, és szerkezete is lehetővé teszi, olyan ellentétes irányú árapály nyomaték keletkezhet, ami azok melegedését, pusztulását is okozhatja. Műholdak esetében ez a hatás nem valószínű, azonban a bolygók kísérő holdjaira veszélyt jelenthet. (lásd hipotetikus Marsi Phobosz’Deimos 6.1 fejezet)

Állandó távolságú kritérium pályák nem csupán az egyenlítői síkon, vagy annak közvetlen környezetében (pl. Clarke pályák), hanem más hajlásszög és excentricitás esetén is létezhetnek.

(A kísérleti program többi műholdjáról gyűjtött és feldolgozott adatok közreadása szintén tervezett).

Támaszthatók azonban további árapály, és más jellegű energetikai kritériumok is, pl. a földközépen nagyságrendekkel nagyobb atmoszférikus ellenállással kapcsolatosan.

5.6 *Műholdpályák árapály-energetikai értékelése vetületi képeik alapján*

A műholdpályák lehetséges mozgásformái egyfajta „szabadságfokok”- melyek között összes energiájuk, és forgási impulzusuk meghatározott szabályok szerint osztódik. Alakjuk annak függvényében módosulhat –„hegyesedésük”, vagy „körkörösödésük” miatt a műhold ütközése, elégése vagy ellenkezőleg- végleges távolodása történhet.

Az árapály és atmoszféra együttes hatása a műholdpályák időben is változó energetikai és alakváltozási folyamatait okozza. Miattuk csak kivételesen mondhatók „zártak”, valójában spirális süllyedésük, vagy távolodásuk tapasztalható. A változó irányú árapály nyomaték miatt a műholdak imbolygása, csavarvonalú mozgása („driftelés”) is felléphet, ami például a rádióvételt befolyásolhatja.

Ezek a jelenségek excentricitásuk, és a monitorképeken megjelenő vetületi képük alapján vizsgálhatók. Mivel a vetületi térképek nem szögtartóak, általában csak tájékozódásra, a műhold aktuális helyzetének meghatározására használják őket.

Kevésbé ismert azonban, hogy általuk a műholdpályák legfontosabb árapály energetikai tulajdonságai szinte „ránézésre” megállapíthatók!

Árapály vizsgálatok esetén ugyanis nem a testek távoli csillagokhoz, hanem egymáshoz viszonyított szögsebessége érdekes. Ha pedig a távoli test keringését valamely földfelszíni ponthoz viszonyítják, akkor **direkt** (növekvő energiájú) pályaszakaszok a „*jobbra hajló*”, **retrográdnak** (csökkenő energiájúnak) pedig a „*balra hajló*” pályaszakaszok tekinthetők, ami a dinamikus vetületi térképeken, melyek a középén látható műhold alatt elmozdulnak, könnyen észlelhető.

5.6.1 *Műholdpályák vetületi képeinek alaktana*

Ez a fejezet a műholdpályák számítógépes megjelenítési módjáról, és értékeléséről szól.

A műholdak földfelszínre vetített útját többnyire hengervetületként (Mercator vetület) ábrázolják, melyen a hosszúsági (meridián) koordináták egymással párhuzamos függőleges, a szélességi (parallel) koordináták pedig vízszintes egyenesként láthatók. A térképek a szélső pályaszakaszok kapcsolódásának bemutatása céljából a földfelület egészét ismétlődően mutatják. Az n2yo adatbázis térképe a Google Earth lehetőségeinek megfelelően kezelhető- nagyítható, kicsinyíthető.

A műhold középén látható, a dinamikus térkép meridiánjai viszont a műhold keringési irányának és sebességének megfelelően mozdulnak el:

- direkt keringési irány esetén jobbról- balra.
- retrográd keringés esetén balról- jobbra.
- szinkron (geostacioner) pályán a képi háttér állandó.

A földi árapály tekintetében direktnek a földfelszín adott pontjához képest viszonyítva „előretartó” (jobbos) keringési irány értendő. Ez esetben a pálya egészének, vagy szakaszainak direkt, illetve retrográd forgása nem csupán a pálya hajlásszögének ($i > 90$ fok), hanem távolságának, excentricitásának függvénye is. Mérések történtek például olyan, a távoli csillagokhoz képest direkt keringési irányú, nagy excentricitású pályák vonatkozásában, melyek földfelszínhez viszonyítva retrográd keringési irányú szakaszainak árapály energia nyeresége meghaladta direkt szakaszaik veszteségét, s így nagytengegyük növekedése történt. (Ez a folyamat azonban egy idő után perigeumuk csökkenése, az atmoszférikus ellenállás növekedése miatt megfordulhat).

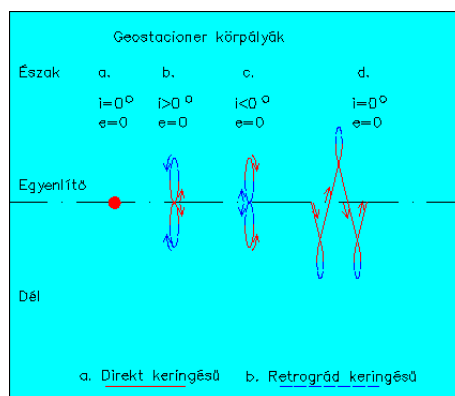
A Föld hengervetületi képét az egyenlítő vonala osztja vízszintesen kettéfelé, melynek találkozási a műholdpálya felszálló és leszálló csomópontjaival a műholdpálya átfordulásának, és perigeum forgásának vizsgálatára legalkalmasabb mérési helyek!

A csomópontok egyenlő hosszúsága körpályára, eltérően ellipszis pályára utal.

A műholdpályák vetületi képei rendkívül változatosak. A továbbiakban- a teljesség igénye nélkül - néhány gyakori formájuk bemutatása történik.

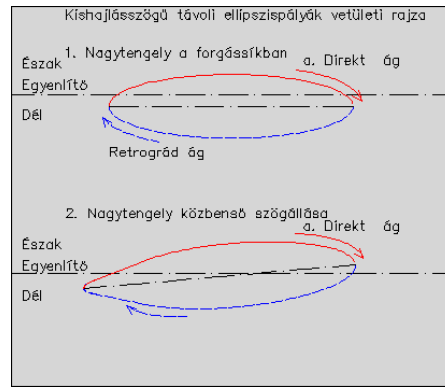
- A Föld **forogássíkjában fekvő geostacioner körpálya** az egyenlítőn egyetlen, helyzetét nem változtató ponttal ábrázolható. (10. ábra)

- A **kis hajlásszögű körpályák** gyakran elnyújtott nyolcassá fajulnak, változó, direkt és retrográd irányultságú szakaszokkal (Clarke pályák, 9. ábra)



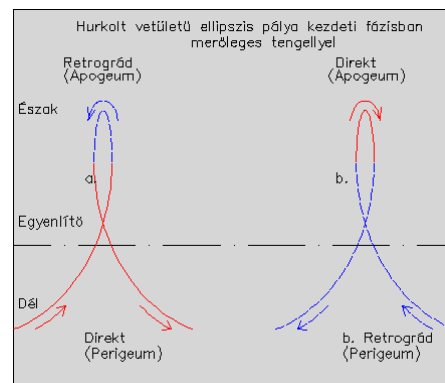
9. ábra Geostacioner, és Clarke pályák vetületi képe

A **forogássíkhöz közeli, nagy excentricitású, távoli ellipszispályák** nyújtott ellipszisként jelennek meg, az előzőhöz hasonló, szakaszonként változó direkt, vagy retrográd irányú keringéssel (10. ábra). Ezek vetületei folyamatosan változnak.

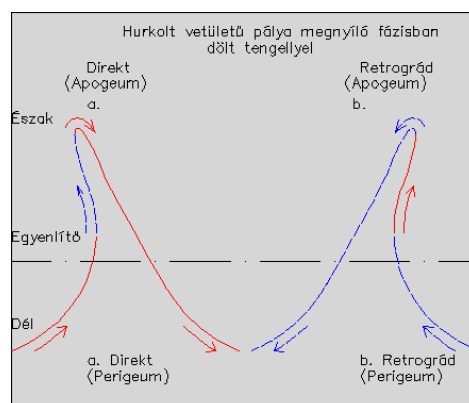


10. ábra Távoli ekvatoriális ellipszis pályák vetületi képe

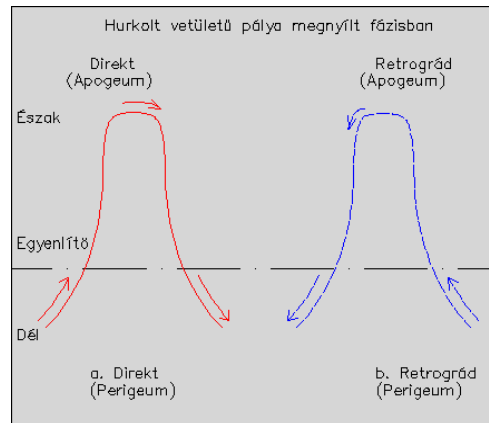
Legváltozatosabb vetületi képei a **távoli, nagy hajlásszögű és excentricitású**, direkt és retrográd szakaszokat vegyesen tartalmazó műholdpályáknak vannak. Értékelésük azonban fokozott figyelmet igényel, mivel a vetületi képen leghosszabb pályaszakaszok időtartamban éppen a legrövidebbek lehetnek. Árapály miatti formálódásukat, átmenetüket szinuszoiddá a 11;12; 13 ábrák mutatják.



11. ábra Távoli ferde ellipszis pályák hurkolt vetületi képe



12. ábra Távoli ferde ellipszis pályák megnyíló félben lévő vetületi képe

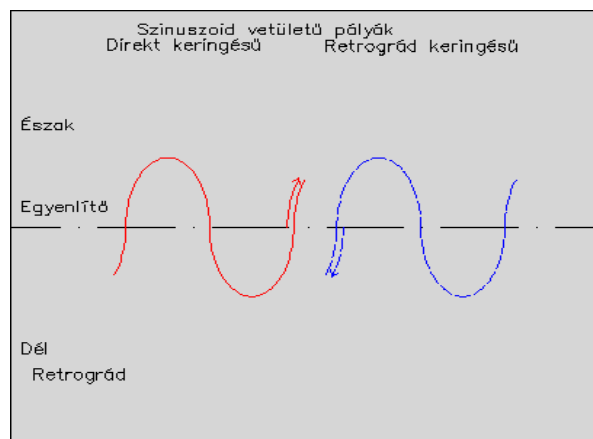


13. ábra Távoli ferde ellipszis pályák teljesen megnyílt, szinuszoid vetületi képe

A kör és a kis excentricitású ferde pályák az egyenlítőt követő szinuszoid görbével ábrázolhatók, ami a legnagyobb amplitúdóját (latitude) a pálya hajlásszögéhez (i) közel éri el.

Ezek bármely szakaszán a műhold haladása azonos irányultságú: direkt, vagy retrográd.

A MASAT-1, és a többi cubesat alatt a térkép jobbról- bal felé mozdul el (direkt), a napszinkron pályák alatt viszont balról- jobb felé (retrográd keringésűek).



14. ábra Kör és kis excentricitású pályák szinuszos vetületi képe

5.6.2 A pályák vetületi képeinek energetikai jelentése

A pályák dinamikus vetületi képein könnyen megkülönböztethető a pályaszakaszok keringési iránya, aminek fontos árapály- energetikai következményei vannak. Az előzőek szerint ugyanis nem csak a nagy hajlásszögű retrográd ($>90^\circ$), hanem a direkt keringésű, azonban ferde, és ellipszis alakú pályáknak is lehetnek energianyereséges, retrográd keringési irányú szakaszai.

Bármely, a vetületen jobbról- balra irányuló pályaszakasznak árapály energia nyeresége, a balról – jobbra irányulónak pedig vesztesége van!

A vizsgált szakaszok paramétereit (sebességük, távolságuk) között azonban jelentős eltérések lehetségesek, amiktől a pálya egészének energianyeresége, vagy vesztesége függ!

Nem mindegy például, hogy a pálya perigeuma a direkt, vagy retrográd szakaszra esik, ami éppen a nagytengely (perigeum) forgása miatt periódikusan cserélődik. Ez esetben annak egy forgásciklusa alatti energiaegyenlegét kell meghatározni, ami okozhatja a nagytengelye növekedését, csökkenését, és különböző energia fajták arányának változását is.

A műholdpályák energia- korrekciójának (dW) számításakor a direkt és retrográd szakaszok előjeles energiaegyenlegét (dW_A) meg kell határozni!

Ami a távoli, nagy excentricitású műholdpályák esetén a pályaelemek különféle, időben is változó módosulását, ingadozását eredményezheti.

A műholdpályák árapály- energetikai tulajdonságai a vetületi térképeken még szemléletesebbé tehetők, ha a direkt és a retrográd keringésű szakaszoknak megkülönböztető (pl. kék és piros) jelzést adnak, a nagytengely helyzetét is megmutatva.

A pályák vetületi rajzának alakitana még számos érdekes, és hasznos következtetést ígér. Ez indokolja az elkezdett vizsgálatok folytatását.

6. Távoli égitestek árapálya

Habár a közlemény földközeli műholdak (MASAT-1) pályáról szól, említés történt bennük más csillagászati, és űrhajózási analógiákról is. Még számtalan hasonló, az elméletet igazoló jelenség lenne bemutatható, a továbbiakban csak két példa ismertetése történik.

6.1 A feltételezett marsi Phobos'Deimos kishold árapály törése

Habár maga a szinkronpálya (ST kritérium, lásd 5.5 fejezet) csak feltételesen állandó távolságú (mert ingadozása is tapasztalható), azonban energetikailag mégsem inaktív- mivel a rajta keringő, nagyobb terjedelmű égitestekben *ellentétes irányú árapály-nyomatékot* kelt, ami melegezésüket, határesetben szétvetődésüket okozhatja.

A továbbiakban az ST árapály- energetikai kritérium hatásának bemutatása történik, a hipotetikus marsi Phobos'Deimos kishold széthullása kapcsán.

Szerző feltételezi, hogy a valaha létezett kishold magját paradox módon éppen a „nyugalom szigetének” vélt marsi szinkronpálya (jelenleg ~21000 km) forralta fel, és vetette szét.

A (központi) Mars forgása főképpen a (távoli) Nap árapálya miatt lassul, amit ST pályája is távolodva követ. Ennek során érte be a több száz millió éve még egy testként keringő

Phobos'Deimos marsi holdat, lassan belémerülve a tömegét felhevítette, magját folyadékszerűvé alakította. Így előzetes becslés szerint ~14000-17000 km távolságban egyfelől árapály erőitani (Roche sugár), másfelől energetikai (ST pálya) szempontból is tartósan kritikus helyzetbe került-

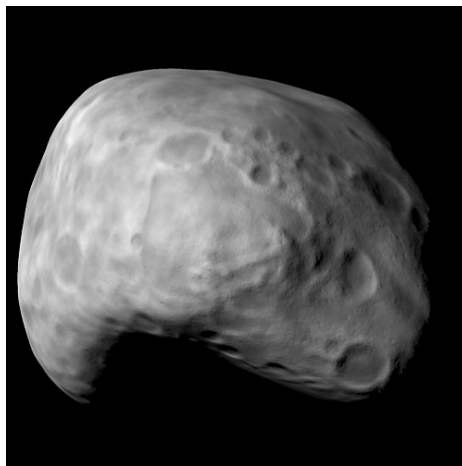
magja megolvadt, szilárdsága lecsökkent, míg végül az árapály erők, és a hő okozta feszültségek együttesen szét is vetették.

A geometriai modell szerint (5.1 fejezet) ekkor tömegének közelítőleg 40-45%-a tört ki a Mars irányába. Ez a koncentrált törmelék- áradat csak kevéssé szóródhatott, elképesztő pusztítást végezve rajta, elfúva légkörét, kráterekkel, és olvadék törmelékekkel hintve felszínét. Nagyobb részét azonban a tengelyirányú gyorsulás inkább kifelé vetette- darabkái eljuthattak a Földre. Olyan eseménynek képzelhető, mint ha a GPS műholdpályán belüli távolságban egy ~50-100 km átmérőjű, lassan felizzó test szétrobban. Hogy volt e már akkor ott élet? Nem tudható! Azonban hogy milyen pályán, mikor történt- az kiszámítható az ST pálya távolodásából.

Most a Phobos a marsi szinkronpálya alatt süllyed, a Deimos pedig felette távolodik mindaddig, amíg a nála gyorsabb marsi ST ismét utol nem éri, és távol a Roche sugártól szétrobbantani már nem lévén képes, süllyedésre készíti.

Valamely égitest megolvadása és széthullása tehát a legnagyobb valószínűséggel a szinkron pálya (ST), és a Roche határ (Ro) egyidejű ráhatása esetén következhet be. Amikor a központi test szinkron pálya alatti és feletti részeire ható, ellentétes irányú nyomaték egyfelől magjának melegedését, és olvadását okozza, csökkentve szilárdságát, másfelől az árapály erők is már kellően nagyok az így meggyöngyült test szétszakítására.

Az árapály energetikai közrehatása a széthullott égitest törmelékeinek állapota alapján igazolható. Amennyiben ugyanis a marsi kishold pusztán a Roche sugár ellentétes tengelyirányú gyorsulás vektorai miatt tört volna szét, részeinek nem lehetne olyan lekerekített formájuk, regolitos felületük, és hosszanti felületi hasadékaik, melyek létrejötte olvadék állapotban valószínűbb.



15. ábra Deimos marsi hold

(Wikipédiából)

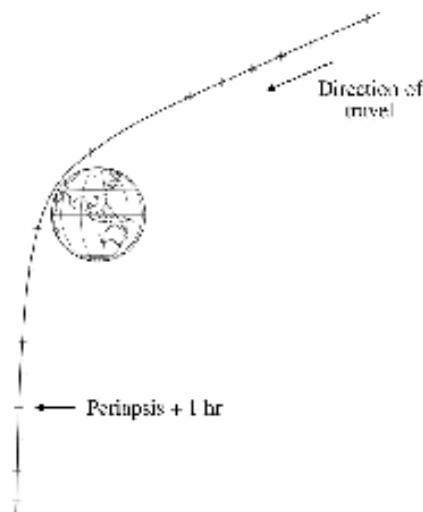
Nehezen képzelhető más olyan folyamat (pl. csomósodás, ütközés), ami a Deimos 15. ábrán látható, olvadékkal körbefolyt gömbhéj alakját létrehozhatta volna...

Azonban a holdak eredete jelenleg is vitatott, hiszen messze a *szilárd* marsi Roche pályán kívül keringenek, így korábbi összetartozásuk és árapálytörésük elképzelhetetlen. Azonban a Phobos már most is a *folyékony* Roche határ alatt kering! Vagyis ha a marsi szinkronpálya (ST) áthaladásakor a kis hold megolvadt, az árapály erők és a hőfeszültségek távolabb is szétvethették!

Mindez arra utal, hogy az *árapály erőtan* nem képes önmagában magyarázatot nyújtani az űr világ jelenségeire, másfelől hogy az *árapály energetika* nélkül az nem is lehetséges.

6.2 Űrszondák flyby anomáliái

Távoli űrmissziókhoz tervezik az ún. „hintamanővert” (flyby), melynek során valamely égitest közelében elhaladva az űrszondák pályajellemzői tervezetten változtathatók: irányuk, sebességük módosítható. Ellenőrzésükre azok a legalkalmasabbak, amelyek közvetlenül a Föld közelében történnek, mivel a vizsgálati metodika olyankor szélesebb körben választható, és nagyobb pontosság érhető el.



16. ábra. A Near űrszonda pályájának ekvatoriális nézete, (1998.01.23-án, forrás [2])

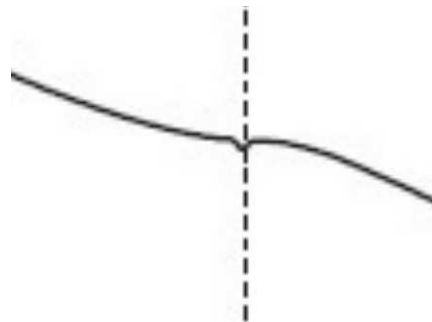
Több ilyen ellenőrzés Doppler (sebességmérés) történt, melyek során az űrszondák sebessége, pálya jellemzői elmélettel és számításokkal jelenleg nem igazolható változásait tapasztalták. [2];[17].

Quantity	Galileo I	Galileo II	NEAR	Cassini	Rosetta-I	Messenger	Rosetta-II	Rosetta-III
Date	12/8/1990	12/12/1992	01/23/1998	08/18/1999	03/04/2005	08/02/2005	11/13/2007	11/13/2009
Speed at infinity, km/s	8.949	8.877	6.851	16.01	3.863	4.056		
Speed at perigee, km/s	13.738	---	12.739	19.03	10.517	10.389	12.49	13.34
Impact parameter, km	11261		12850	8973	22680.49	22319		
Minimal altitude, km	956	303	532	1172	1954	2336	5322	2483
Spacecraft mass, kg	2497.1		730.40	4612.1	2895.2	1085.6	2895	2895
Trajectory inclination to equator, degrees	142.9	138.9	108.8	25.4	144.9	133.1		
Deflection angle, degrees	47.46	51.1	66.92	19.66	99.396	94.7		
Speed increment at infinity, mm/s	3.92±0.08	-4.60±1.00	13.46±0.13	-2±1	1.82±0.05	0.02±0.01		
Speed increment at perigee, mm/s	2.56±0.05		7.21±0.07	-1.7±0.9	0.67±0.02	0.008±0.004	~0	-0.004±0.044
Gained energy, J/kg	35.1±0.7		92.2±0.9		7.03±0.19			

17. ábra Űrszondák flyby anomáliái (forrás: [2])

A probléma megoldásának sokféle lehetőségével próbálkoznak jelenleg is. Nehezen magyarázható azonban, hogy a szakirodalomban miért egyedül az **árapály-energetika** nem merült fel még kellő súllyal?

A következő ábra a műhold pályáját mutatja a Föld közelében, ahol annak árapálya előbb közelíti, majd távolítja.



18. ábra. A Near Űrszonda pálya elhajlása a földi periapsziséjánál (szerző kiemelése [2]-ből)

A Földre meghatározott árapály csatolási tényezővel (Φ) végzett vizsgálatok [12] igazolták, hogy az Űrszondák sebesség anomáliáinak árapály energetikai okai vannak.

7. Irodalom

N	Szerző	Cím (Tartalom)	Kiadó, hivatkozás	Év
1		Műhold adatbázis	www.n2yo.com/database)	Frissítve
2	J.D. Anderson; J.K. Campbell; J.E. Ekelund; J. Ellis; J.F. Jordan	"Anomalous Orbital-Energy Changes Observed during Spacecraft Flybys of Earth"	Phys. Rev. Lett. 100 (91102): 091102, Bibcode 2008PhRvL.100i1102A, doi:10.1103/PhysRevLett.100.091102	2008
3	Németh Judit	<u>Mi az a sötét energia</u>	Fizikai szemle	2004/1
4.	Németh Judit ELTE TTK Elm. Fiz. Tan. Szabados László MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati KI	<u>A sötét anyag</u>	Fizikai Szemle 362.o.	2006/11.
5.	Dr. Völgyesi Lajos	<u>Geofizika</u>	Műegyetemi Kiadó	2002
6.	Dr. Földessy János	<u>Fizikai földtan</u>	http://fold1.ftt.uni-miskolc.hu/~foldfj/fizgeol/...	2010
7.	Bodács István	<u>A Hold és hatásai a Földre</u>	http://vmek.oszk.hu/00500/00558/html/dip4.htm	
8.	Érdi Bálint.	Égi mechanika . a. A mesterséges hold mozgása a Föld légkörében b. A mesterséges holdakra ható egyéb perturbáló erők	http://astro.elte.hu/~erdi/publications/E_MIII3fejezet.pdf , 15-jan-2008 15:34 http://astro.elte.hu/~erdi/publications/E_MIII4fejezet.pdf , 15-jan-2008 15:34	2008
9.	Dr. Práger Tamás Pieczka Ildikó	<u>Oceanografia</u> <u>Az árapály jelenségek elméleti (dinamikai) leírása</u>	http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/oceanografia/ch07s02.html	2013
10.	Dr. Tony Phillips	A Puzzling Collapse Of Earth Upper atmosphere	Science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/15jul_termposphere	2010
11.	ESA	EOPS-SAT 4. fejezet Mission Analysis	CDF Study Report: CDF-128(A) (Releasable to the public)	2012.02
12.	Forrai György	Az árapály hatása az űrszondákra és a műholdakra	www.megismerhetetlen.com 2.2 kötet	2012
13.	Forrai György	Galaxisok peremén (általános árapály, vagy sötét anyag?)	www.megismerhetetlen.com 2.5 kötet	2012
14.	Forrai György	Hubble törvény- mint az általános árapály következménye"	www.megismerhetetlen.com 2.6 kötet	2012
15.	Forrai György	A Naprendszer kronológiája. 1 rész Kiszakadásos elmélet. A bolygók árapály vándorlása	www.megismerhetetlen.com 2.7 kötet	2012
16.	Forrai György	A Naprendszer kronológiája. 2 rész Példák, kiegészítések. A Föld és a Hold árapály vándorlása	www.megismerhetetlen.com 2.8 kötet	2012
17		Internetes források <u>Tartalom : Flyby anomaly</u>	http://en.wikipedia.org/Flyby_anomaly	
n		Csillagászati hírek, közlemények	Wikipédia, Wikimédia	
...				