

Űrszonda kameráinak optikai vizsgálata

Asteroid framing camera optical performance test

¹KISS Zsanett, MSc., ²Dr. NAGY Balázs Vince, Phd, egyetemi docens

^{1,2} Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest Műegyetem rkp. 3.,
Központi tel.: +36 1 463-1111, Központi fax: +36 1 463-1110,
Központi e-mail cím: info@bme.hu, <https://www.bme.hu/>

Kivonat

Munkánk során a göttingeni Max Planck Institut für Sonnensystemforschung egy kutatócsoportjával egy űrkamera előkészítésében vettünk részt. A kamerák kilövése előtti készülétek során optikai tesztekkel vizsgáltuk a CCD detektor és a szűrők optikai tulajdonságait. A dolgozat során bemutatjuk a méréseket, valamint az elkészített kiértékelő algoritmusokat. Az eredményeknek fontos szerepük van a döntésben, hogy a küldetés megvalósul-e, ezen kívül a későbbi képek feldolgozásához is segítséget adnak.

Kulcsszavak: kamera kalibráció, űrszonda kamera, adatelemzés, optikai tesztek, kiértékelő algoritmus

Abstract

We had the opportunity to prepare an asteroid framing camera with a team at the Max Planck Institute for Solar System Research in Göttingen. Before the launch of the cameras, we tested the optical properties of the CCD detector and the optical filters. In our paper we explain the tests and present the evaluating algorithms we made for the tests. The results have great effect on the decision whether the project will be executed or not, and it also helps in processing the photos taken by the camera in the future.

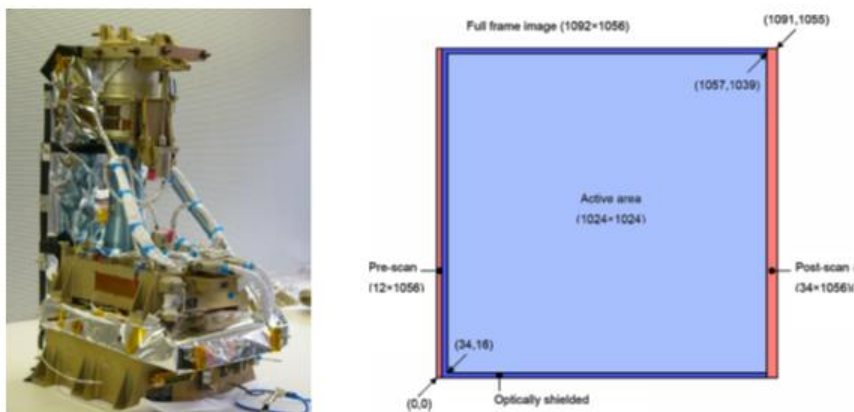
1. BEVEZETÉS

A HERA küldetés a NASA DART projektjének kiegészítéseként készül, mely aszteroidák meglövése után számítja a pályájukról való letérést, valamint egyéb változásait, hogy kiderítsék, minként lehet egy esetleg a Földre is veszélyes aszteroidát eltéríteni a pályájáról. A HERA küldetés során két aszteroida megfigyelő kamerát lőnének fel egy űrszondával, melyek optikai tesztjét végzetük el.

1.1 Űrszonda kameráinak bemutatása

A kilövésre szánt kamera felépítését mutatja az 1. ábra bal oldali képe. Az alsó dobozban található az adatfeldolgozáshoz és szabályozáshoz szükséges elektronikák. Efelett hőszigetelve helyezkedik el a kamera fej, mely tartalmaz egy CCD detektort a hozzá tartozó elektronikával, valamint különböző spektrális szűrőkkel ellátott kereket, mely segítségével nem csak az égitestek felszínéről kapunk képet, hanem többek között a különböző anyagösszetétel is vizsgálható. Felette egy lencserendszer található, melyet egy lezárható ajtó véd a külvilágtól, ha nem készül felvétel épp a kamerával. [1]

A kamerák optikai tesztjei során a CCD teljes méretű képei kerültek feldolgozásra, mely 1092x1056 pixelből áll. Ebből az 1. ábra jobb oldalán világos kékkel jelzett 1024x1024 pixel a tényleges fényérzékeny rész. A detektor két szélső része, az úgynevezett pre-scan és post-scan részek fizikailag nem tartalmaznak fényérzékeny területhez, ezeket csupán a kiolvasó elektronika állítja elő. Emiatt ezeknek a területeknek a segítségével tudjuk az elektronika okozta eltéréseket korrigálni a képeken. A sötétképpel jelzett rész már tartalmaz fényérzékeny pixeleket, azonban takarva vannak a fénytől, így ezek referenciaként szolgálnak a sötét áram méréséhez. [1]



1. ábra Űrszonda kameráinak felépítése (bal) és a detektor részei (jobb)

1.2 Optikai mérések bemutatása

A méréseket a Max Planck Institut für Sonnensystemforschung egy ISO 6-os besorolású tiszta terében végeztük el. A kamerákat a méréshez egy vákuumkamrába helyezték, így hasonló körülmények között zajlottak a tesztek, mint amik az űrben is várják az eszközöket. A kamrában a nyomás kisebb volt, mint 5×10^{-5} mBar, valamint a CCD és a kamera több pontjára helyezett szenzorral ellenőriztük a hőmérsékletet is. Az FM1 kamera esetén a hőmérsékletet 225-229,5 K között, az FS2 esetén 229-232 K között mértük.

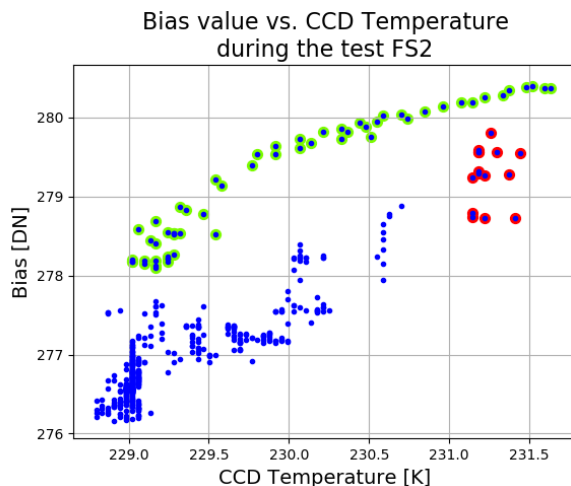
A tesztek elvégzésére különböző fényforrásokat használtunk. A homogenitás és a maradó töltések vizsgálatához integráló gömb volt a fényforrás, a pontszórás függvény méréséhez pedig egy kollimátor fókuszpontjába helyezett pinhole tárgyat használtunk, melyet halogén lámpa világított meg.

2. OPTIKAI TESZT EREDMÉNYEINEK FELDOLGOZÁSA

2.1 Bias és sötét áram mérése

Az első mérések a kiolvasó elektronika által a képekhez adott bias feszültség értéket, valamint az exponálás alatt felgyülemlő sötétáramot vizsgálta. Mindkét esetben zárt kamera ajtóval készítettünk felvételeket, bias esetén nulla, míg sötétáram mérésénél különböző expozíciós időt állítottunk be.

A kiértékelés során összehasonlítottuk az aktív kép átlag pixelértékét és szórását a pre-scan terület átlagával és szórásával. A két területre nagyjából megegyeztek az értékek, csak a második tizedesjegyben volt eltérés, így a pre-scan terület a további képeknél is jól reprezentálja a bias értéket. Ezen kívül megfigyeltük, hogy a bias változott a mérések folyamán, így programommal ábrázoltuk a mérés során összes képet a hőmérsékelt függvényében, ezt mutatja a 2. ábra. Látható kis mértékű korreláció, azonban nem kizárólag a hőmérséklet befolyásolja a bias alakulását.



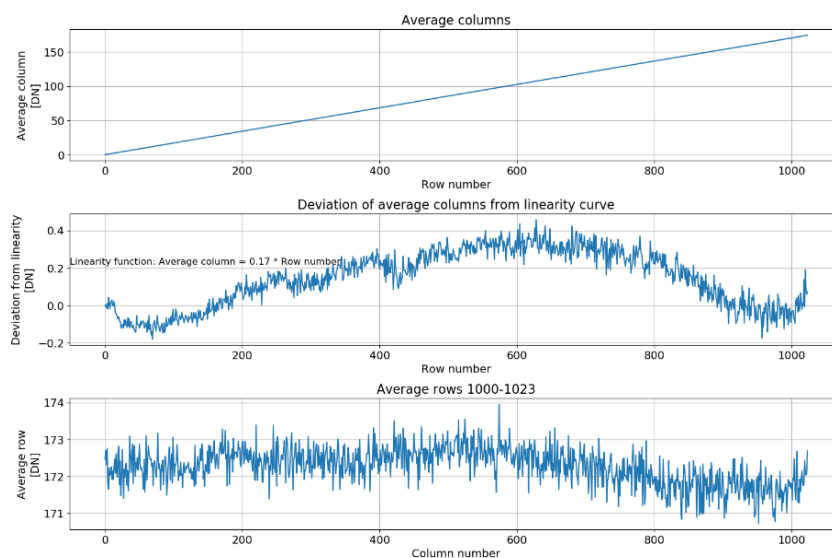
2. ábra Bias érték a detektor hőmérséklet függvényében az FM1 kamera mérése alatt

A sötétáram mérésére készült képek kiértékelésénél első lépésben kivontuk a pre-scan területből számított bias értéket minden pixelből, és ezután vizsgáltuk az aktív terület átlagát. Minden érték esetén megjelöltük a detektor hőmérsékletet és az expozíciós időt is, mivel ezek befolyásolják első sorban az eredményeket. Ahhoz, hogy vizsgálhassuk az esetleges kiegészített pixeleket, illetve a sötét áram értékét, ábrázoltuk a sötétáram spektrumát is, mely megmutatja, hogy az adott intenzitás értéket hány pixel vette fel az adott képen. Ennek segítségével csupán pár hot pixel-t találtunk.

2.2 Maradó töltések és linearitás vizsgálata

A detektor további vizsgálatához ellenőriztük, hogy a kiürítés után maradnak-e az előző képből visszamaradó töltések, illetve mérésekkel megfigyeltük a detektor lineáris viselkedését a növekvő expozíciós idő függvényében. Mindkét méréshez az integráló gömbbel készítettünk felvételeket.

A maradó töltésekhez nulla expozíciós időt állítottunk be. Ebben az esetben a képeken csak az úgynevezett read-out smear jelenség látható, mely egy lineárisan növekvő intenzitást jelent, és amiatt jelenik meg, mert a detektor a pixeleket egy letakart részére tolja, és ez alatt az idő alatt az fentebb lévő sorok többlet megvilágítást kapnak. Ezt a jelenséget leginkább kis expozíciós időnél vehetjük észre. A kiértékelésnél tehát vizsgáltuk a sorokban található átlag értékeket, melyeknek lineáris tendenciát kell követniük, valamint az oszlopok átlagát is, ahol közel konstansnak kell lennie az értékeknek. A 3. ábra mutatja, hogy az elvárt tendenciákat közelítőleg tartja a detektor, a lineáristól is csak kis mértékű az eltérése a soroknak, így a detektor kiürítése jól működik.



3. ábra Oszlopok átlaga, azok lineáris trendtől való eltérése, valamint sorok átlaga FM' kamera esetén

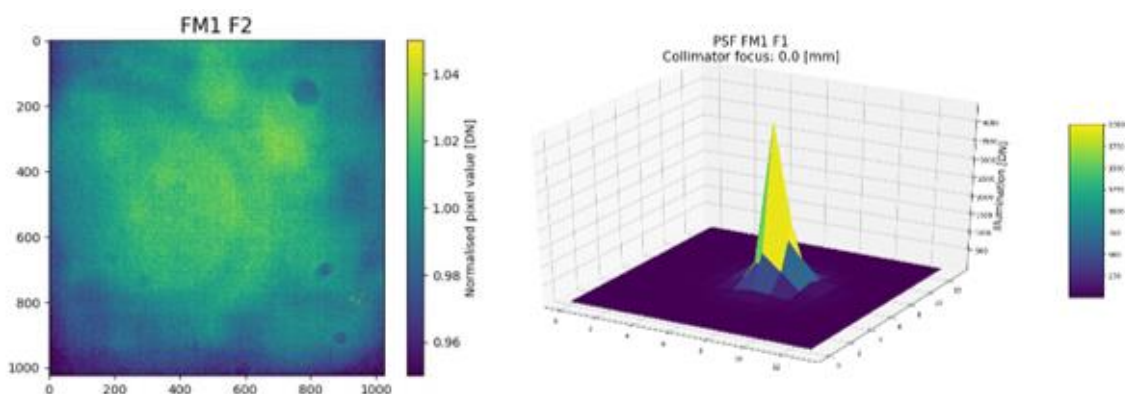
A linearitás vizsgálatánál a képeket növekvő expozíciós idővel készítettük, így a detektorra érkező fotonok száma is nőtt. Ennek hatására a pixelek értékének az expozíciós idő függvényében lineárisan növekvő kell legyen. A képek kiértékelése során a bias és a read-out smear eltávolítása után kiszámoltuk a képek aktív területének átlag értékét, ábrázoltuk az expozíciós idő függvényében és erre egy origóból induló egyenest illesztettünk. Mivel a detektor karakterisztikája ellaposodik ahogy kezd telítésbe kerülni, így csak az első lineáris szakaszra végeztük el az illesztést, és vizsgáltuk a pontok eltérését az egyenestől. A magasabb expozíciós időnél az eltérés nagyobb mértéket mutatott, így a képek korrigálásánál egy olyan algoritmust kell alkalmazni, mely ezt figyelembe veszi.

2.3 Homogenitás és pontszórás függvény vizsgálata

Ahhoz, hogy a teljes optikai rendszer leképezéséről információt kapjunk, vizsgáltuk a homogenitását a rendszernek. Ezzel a módszerrel ki tudtuk szűrni a rendszerben lévő porszemeket, valamint a szűrők inhomogenitását is. A képeket az integráló gömb segítségével készítettük el szűrőnként eltérő expozíciós idővel. A kiértékelésnél a bias és a read-out smear korrigálása után több azonos szűrővel készült képből átlag képet számítottunk, melynek pixel értékeit normalizáltuk, így láthatóvá váltak a kisebb inhomogenitások is (4. ábra, bal oldal). Bár némely szűrőnél az inhomogenitás

látható volt, a kritériumoknak megfeleltek ezek is. Egy szűrő esetén találtunk nagyobb hibát, mely miatt az nem használható ebben a formájában majd a küldetés során.

A másik fontos mérés a leképezés minősítéséhez a pontszórás függvény. Itt egy pinhole segítségével vizsgáltuk, hogy a rendszer egy pontszerű tárgyat milyen alakban képez le a detektorra. Az elméleti függvény alak egy Bessel függvény, melyet a számítások során Gauß-függvénnyel közelítünk. A leképezést vizsgáltuk a detektor középpontjában, miközben a kollimátor fókusztávolságát változtattuk. Programomban a képek bias és read-out smear korrigálása után ábrázoltuk az intenzitásokat a detektor koordinátáinak függvényében (4. ábra, jobb oldal). Ezekre az intenzitás értékekre illesztettünk két dimenziós Gauß-függvényt, melynek átmérőjének fele megadja a pontszórás függvény értékét. Ennek az értéknek a minimuma ott található, ahol a kollimátor fókusztávolsága megegyezik a kamerarendszer fókusztávolságával. Az ideális fókusztávolság a képek alapján látható volt, azonban a Gauß-függvény illesztését zavarták a korrekció után is megmaradt háttérzajok, így a pontos számításhoz szükségesek további korrekciók is.



4. ábra FM1 kamera F2 szűrőjének homogenitása (bal) és F1 szűrőjének pontszórásfüggvénye (jobb)

3. EREDMÉNYEK

Az űrszonda kameráira összesen hat fontos tesztet végeztünk el, melyeknek kiértékelésére Python programot készült. Ezzel a programmal meghatározhatók a kamera elektronikájának és optikai rendszerének legfontosabb paraméterei, valamint a küldetés során is felhasználhatók az egyes függvényei a képek korrigálásához. A tesztek eredményei hozzájárultak a döntéshez, hogy a küldetés megvalósulhasson.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az előadó részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, "A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása" pályázat támogatta. Készült az MTA Bolyai János kutatási ösztöndíj támogatásával.

FELHASZNÁLT IRODALMAK

1. H. Sierks, H.U.Keller, R. Jaumann, H. Michalik, T. Behnke, F. Bubenhausen, I. Büttner, U. Carsenty, U. Christensen, R. Enge, B. Fiethe, P. Gutiérrez Marques, H. Hartwig, H. Krüger, W. Kühne, T. Maue, S. Mottola, A. Nathues, K.-U. Reiche, M.L. Richards, T. Roatsch, S.E. Schröder, I. Szemerey, M. Tschentscher: *The Dawn Framing Camera*, Springer Science + Business Media B.V.2011, 8. February 2010
2. S.E.Schröder, T. Maue, P. Gutiérrez Marqués, S. Mottola, K.M. Aye, H. Sierks, H.U. Keller, A.Nathues: *In-flight Calibration of the Dawn Framing Camera*, 31. January 2017
3. Gabor Kovacs, Holger Sierks, Andreas Nathues, Michael Richards, Pablo Gutierrez-Marques, *Stray light calibration of the Dawn Framing Camera*, Proc. SPIE 8889, Sen-sors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII, 888912, 24 October 2013