****

**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**ESA spiečiaus palydovai**

Semestro projektas

|  |
| --- |
|  |
| **Žygimantas Marma**  Studentas |
|  |
| **Prof. Darius Gailius**  Dėstytojas |
|  |

**Kaunas, 2023**

Turinys

[Paveikslų sąrašas 3](#_Toc150156812)

[Santrumpų ir terminų sąrašas 4](#_Toc150156813)

[Įvadas 5](#_Toc150156814)

[1. Kosmoso palydovai 6](#_Toc150156815)

[2. Palydovo architektūra 10](#_Toc150156816)

[3. Realūs panaudojimai 15](#_Toc150156817)

[Išvados 16](#_Toc150156818)

[Literatūros sąrašas 17](#_Toc150156819)

Paveikslų sąrašas

[1 pav. „MagSat“ palydovo architektūra 7](#_Toc150156853)

[2 pav. Realūs „Swarm“ palydovai 9](#_Toc150156854)

[3 pav. „Swarm“ misijos konceptas 10](#_Toc150156855)

[4 pav. Palydovo architektūra 11](#_Toc150156856)

[5 pav AOCS struktūra 11](#_Toc150156857)

Santrumpų ir terminų sąrašas

**Santrumpos:**

ESA

NASA

AOCS –

ADCS – pokrypio nustatymo ir valdymo sistema (*angl. Attitude Determination and Control System*)

COTS – rinkoje laisvai prienami produktai (*angl. Commercial off-the-shelf*)

FC – skrydžio valdiklis (*angl. Flight controller*)

**Terminai:**

**aaaaa**

**Propulsija (angl. *propulsion*)** – sistema, naudojama kosmoso palydovams manevruoti.

**Femtopalydovai** – itin maži palydovai, kurių tūris mažesnis nei 10cm3.

Įvadas

PERRASYTI??? -> akcentuoti kam reikalingas magnetins laukas ir jo žinojimas

The history of magnetic discovery goes back to about 110 B.C., when the earliest magnetic compass was invented by the Chinese. They noticed that if a “lodestone” (natural magnets of iron-rich ore) was suspended so it could turn freely, it would always point in the same direction, toward the magnetic poles. This directional pointing property of magnetic material was eventually introduced into the making of an early compass and used for maritime navigation . By the 13th century, the directive property of magnetism was widely recognized and used in navigation. The mariner’s magnetic compass is the first technological application of magnetism and, one of the oldest scientific instruments.

Until 1820, the only magnetism known was that of iron magnets and of lodestones. It was the Danish physicist Hans Christian Ørsted, professor at the University of Copenhagen, who, in 1820, was first to discover the relationship between the hitherto separate fields of electricity and magnetism. Ørsted showed that a compass needle was deflected when an electric current passed through a wire, before Faraday had formulated the physical law that carries his name: the magnetic field produced is proportional to the intensity of the current. Magnetostatics is the study of static magnetic fields, i.e. fields which do not vary with time. 19) 20)

Magnetic and electric fields together form the two components of electromagnetism. Electromagnetic waves can move freely through space, and also through most materials at pretty much every frequency band (radio waves, microwaves, infrared, visible light, ultraviolet light, X-rays and gamma rays). Electromagnetic fields therefore combine electric and magnetic force fields that may be natural (the Earth's magnetic field) or man-made (low frequencies such as electric power transmission lines and cables, or higher frequencies such as radio waves (including cell phones) or television (Ref. 21).

Mūsų planetos šerdis yra ta vieta, kur atsiranda didžioji dalis Žemės magnetinio lauko. Jis gaminamas savaimio dinamo proceso metu, kai naudojama išlydyta geležis, judanti turbulenciniais judesiais. Tačiau pagrindinis magnetinio lauko komponentas, esantis už šerdies, yra magnetinis dipolis. Šis komponentas, šiuo metu krinta greičiu, nei kažkada anksčiau. Per pastaruosius 150 metų dipolio momentas sumažėjo maždaug 8%.

Pietų Atlanto anomalijoje, kur laukas ir taip yra silpniausias, šis praradimas prisidėjo prie daug didesnių regioninių poslinkių – net 10 % per pastaruosius 20 metų, kartu su nedipoliais pokyčiais.

Būtent todėl žemės magnetinis laukas yra begalo svarbus.

Šiandien, tyrinėdami Žemės magnetinio lauko paslaptis ir jos įtaką mūsų planėtai, negalime nepasigilinti į Europos kosmoso agentūros (ESA) inovatyvią misją – spiečiaus palydovų sistemą "Swarm". Tai ne tik technologinis šuolis žemės mokslų srityje, bet ir unikalus būdas tyrinėti geomagnetinius reiškinius iš orbitos. Šiame referate išsamiai yra išanalizuota "Swarm" palydovų misiją, jos tikslai bei duomenų rinkimo metodika. Be to, darbe yra aptariame kaip šie palydovai praplečia mūsų supratimą apie Žemės magnetinį lauką ir jo kintamumus. Ši misija buvo pradėta siekiant giliau suprasti Žemės magnetinio lauko kilmę, dinamiką ir sąveiką su aplinkos veiksniais. Būtent dėl šių priežasčių šiame darbe yra nagrinėjamos "Swarm" palydovų konstrukcijos, jų tyrimų tikslai bei svarbiausi rezultatai, kurie praplečia mūsų supratimą apie Žemės magnetinį lauką.

# Kosmoso palydovai

Kosminiai palydovai yra dirbtiniai objektai, kurie yra iškeliami į orbitą aplink Žemę ar kitus dangaus kūnus. Jie paleidžiami į kosmosą naudojant raketas ir naudojami įvairiems tikslams, įskaitant ryšį, navigaciją, orų prognozes ir mokslinius tyrimus.

Kosminiai palydovai yra svarbi mūsų šiuolaikinės visuomenės dalis ir turi daug praktinių pritaikymų, pavyzdžiui, suteikia prieigą prie interneto, įgalina GPS navigaciją ir padeda numatyti bei sekti orų tendencijas. Be jų mūsų šiuolaikinis gyvenimas nebūtų galimas, tačiau dirbtiniai palydovai tapo realybe tik XX amžiaus viduryje. Pirmasis dirbtinis palydovas buvo *Sputnik 1*, Rusijos kosminis zondas, pakilęs 1957 m. spalio 4 d. Šis veiksmas sukrėtė didžiąją dalį Vakarų pasaulio, nes buvo manoma, kad sovietai neturėjo galimybių siųsti palydovų į erdvę.

Šiuo metu kosmose skrieja tūkstančiai žmogaus sukurtų palydovų. Vieni fotografuoja žemę, kad padėtų meteorologams prognozuoti orą ir sekti uraganus, kiti fotografuoja kitas planetas, saulę, juodąsias skyles, tamsiąją materiją ar tolimas galaktikas. Šie vaizdai padeda mokslininkams suprasti Saulės sistemą ir visatą. Maždaug pusė visų kosmoso palydovų vykdo mokslinių tyrimų misijas, kurios dažniausiai būna susijusios su atmosferos, visata ar Žemės tyrinėjimu [1]. Konkrečiau mokslo tyrimų sritys apima: biologijos mokslą, netoli Žemės esančių objektų, klimato kaitos, sniego / ledo dangos, orbitos šiukšlių, planetų tyrinėjimo ir tolimojo kosmoso astronomijos tyrimus. Du trečdaliai visų misijų yra naujų technologijų kūrimas arba demonstravimas. Duomenų perdavimo sistemos, propulsijos sistemos, nauji navigacijos ir valdymo algoritmai bei radiacijos bandymai yra dažniausiai pasitaikančios misijų rūšys. Kitos galimos technologijos yra saulės burės, femtopalydovai (itin maži) ir išmaniųjų telefonų palydovai. Pastaraisiais metais itin sumažėjusios pakilimo į orbitą išlaidos leidžia vykdyti didesnės rizikos veiklą, kuri nebūtų įmanoma didelės apimties ESA ar NASA misijose.

## Europos Kosmoso agentūra

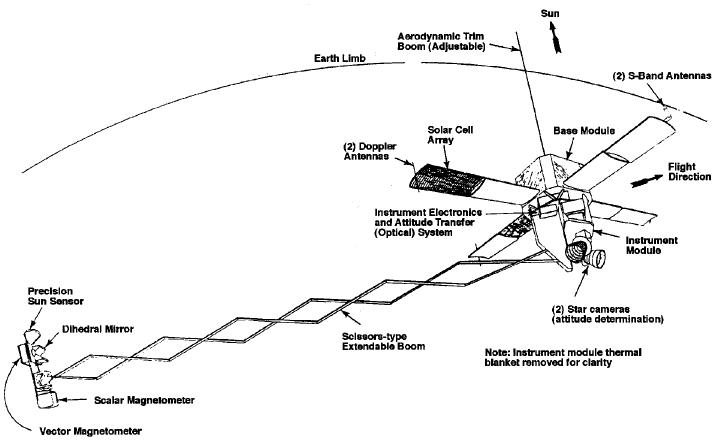
Europos Kosmoso agentūra (ESA) yra tarptautinė organizacija, įkurta 1975 metais, kurios tikslas yra plėtoti ir koordinuoti Europos kosmoso tyrimus. ESA yra sudaryta iš 22 valstybių narių, įskaitant daugelį Europos Sąjungos valstybių. Jos veikla yra orientuota į taikius kosmoso tyrimus, technologijų plėtrą ir kosmoso naudojimą moksliniams, ekonominiams ir saugumo tikslams.

ESA yra žinoma dėl įvairių sėkmingų kosmoso misijų, kurios apima palydovų siuntimus, tarptautinius kosminius stoties projektus ir kitus ambicingus tyrimus. Misijos yra kuriamos siekiant atsakyti į įvairius mokslinius klausimus, suprasti kosmoso reiškinius ir pritaikyti kosminę technologiją žmogaus naudai. ESA taip pat įgyvendina kitas misijas, įskaitant palydovų tyrimus apie klimato kaitą, Žemės atmosferos stebėjimus, Marsą tyrinėjančius zondus ir daugelį kitų projektų. Vienos iš žymiausių ESA misijų yra *Hubble* kosmoso teleskopas, *Gaia* kosmoso observatorija ir Marso orbitos misija – „Mars express“. Kiekviena iš šių misijų padeda žmonijai suprasti mūsų planetą, kosmoso reiškinius ir platesnį Visatos kontekstą.

### MAGsat misija

„Magsat“ (arba „Explorer 61“) projektas buvo bendras NASA ir Jungtinių Valstijų geologijos tarnybų pastangos išmatuoti arti žemės esančius magnetinius laukus pasauliniu mastu. Ši misija, buvo paleista 1979 m. Jos tikslas buvo gauti tikslų žemės magnetinio lauko aprašymą, gauti duomenis, naudojamus atnaujinant ir tobulinant pasaulio ir regionines magnetines diagramas, sudaryti pasaulinį plutos magnetinių anomalijų žemėlapį bei sudaryti tikslius geologinius/geofizinius žemės plutos modelius.

Pagrindinei misija – nustatyti Žemės magnetinį lauką, palydovas naudoko du magnetometrus. Skaliariniai (cezio garais pagrįstą) ir vektoriniai magnetometrai suteikė „Magsat“ daugiau galimybių nei bet kuris ankstesnis erdvėlaivis. Pasitelkiant išsiplečiančią teleskopine strėlę, magnetometrai buvo nutolę nuo palydovo ir jo elektronikos sukurto magnetinio lauko. Palydovas turėjo du magnetometrus: trijų ašių „fluxgate“ magnetometrą, skirtą magnetinių laukų stiprumui ir krypčiai nustatyti, ir jonų garų/vektoriaus magnetometrą, skirtą paties vektorinio magnetometro sukeliamam magnetiniam laukui nustatyti. „Magsat“ laikomas vienu iš svarbesnių mokslo ir žemės orbitoje skriejančių palydovų; jo sukaupti duomenys vis dar naudojami, ypač susiejant naujus palydovinius duomenis su ankstesniais stebėjimais.



1 pav. „MagSat“ palydovo architektūra

Pagrindinis erdvėlaivis buvo sudarytas iš dviejų skirtingų dalių: prietaiso modulio, kuriame buvo vektorinis ir skaliarinis magnetometrai bei jų unikali pagalbinė įranga bei bazinio modulio, kuriame buvo būtini duomenų perdavimo, maitinimo, ryšio, komandų ir padėties-orientacijos valdymo posistemės. Bazinis modulis su jo posistemiais buvo sudarytas iš likusios „Small Astronomy Satellite“ aparatinės įrangos. Magnetometrai buvo dislokuoti po paleidimo į padėtį 6 metru atstumu už erdvėlaivio. Šiuo atstumu magnetinių medžiagų įtaka iš prietaiso ir pagrindinio modulio (daugiausia iš žvaigždžių kamerų) buvo mažesnė nei 1 mT. Kas sekundę buvo gauti šešiolika pilnų vektorinio magnetinio lauko matavimų ir aštuoni skaliariniai matavimai. Orbita, kurioje skriejo palydovas, leido jam nustatyti daugumą Žemės paviršių, išskyrus geografinius ašigalius. Iš viso palydovo misija truko 7,5 mėnesius.

[ref magsat] - https://www.eoportal.org/other-space-activities/magsat#spacecraft

## ESA’s Swarm palydovų misija

„Swarm“ arba spiečiaus misija buvo vienas iš misijų pasiūlymų, pateiktu atsakant į ESA Žemės stebėjimo programos kvietimą teikti „Galimybių misijos“ pasiūlymus. Tarp 25 pateiktų pasiūlymų Swarm buvo vienas iš trijų kandidatų, atrinktų galimybių studijoms. Pirmieji etapo tyrimai buvo baigti 2004 m., o rezultatai buvo įtraukti į vertinimo ataskaitą, pateiktą galutinei misijos atrankai. 2004 m. gegužę „Swarm“ misija buvo pasirinkta kaip penktoji „Earth Explorer“ misija pagal ESA „Living Planet“ programą, kuri buvo galiausiai paleista į orbitą 2013 m. lapkričio 22 d.

„Swarm“ misija siekia ištirti Žemės magnetinį lauką, kad gautų mokslines įžvalgas ir pritaikytų praktikoje. Pagrindinės motyvacijos yra dinamiško lauko pobūdžio tyrimas, siekiant suprasti Žemės vidinius procesus, geomagnetinių variacijų tyrimas siekiant tobulinti geofiziką, kosminių oro sąlygų poveikio palydovų operacijoms įvertinimas, tikslių magnetinio lauko žinių panaudojimas navigacijos ir palydovų technologijoms bei indėlis į jonosferos ir magnetosferos tyrimus. Trijų palydovų („Alpha“, „Bravo“ ir „Charlie“) vykdoma misija siekiama pateikti išsamius matavimus, leidžiančius sudaryti didelės raiškos žemėlapius ir trimačius modelius, kad būtų galima geriau suprasti magnetinio lauko struktūrą ir dinamiką.

Misija pasieks geriausią visų laikų geomagnetinio lauko ir dabartinio kitimo tyrimą, kuris leis įgyti naujų įžvalgų apie Žemės sistemą, pagerinant mūsų supratimą apie Žemės vidų ir jos poveikį geoerdvei – regionui aplink Žemę, kuriame vyksta elektrodinaminiai procesai, veikiant Žemės magnetinio lauko. Šią misiją sudarys trijų palydovų žvaigždynas. Du erdvėlaiviai skris vienas šalia kito mažesniame aukštyje (450 km pradinėje orbitoje), tokiu būdu išmatuodami magnetinio lauko gradientą rytuose-vakaruose, o trečiasis skris didesniame aukštyje (530 km). Didelio tikslumo ir didelės skiriamosios gebos magnetinio lauko stiprio, krypties ir kitimo matavimai, papildyti tiksliais navigacijos, akselerometro ir elektrinio lauko matavimais, suteiks reikiamų stebėjimų, kurių reikia norint atskirti ir modeliuoti įvairius geomagnetinio lauko šaltinius. Tai sudarys unikalų „vaizdą“ Žemės viduje iš kosmoso, kad būtų galima ištirti jos vidaus sudėtį ir procesus. Tai taip pat leis analizuoti Saulės įtaką Žemės sistemoje esantiems objektams. Be to, Swarm koncepcija bus naudinga praktiniams pritaikymams daugelyje skirtingų sričių, pavyzdžiui, orų erdvėje, radiacijos pavojaus ir navigacijos.



2 pav. Realūs „Swarm“ palydovai

Taigi, pagrindiniai Swarm misijos tikslai yra šie:

Žemės magnetinio lauko žemėlapių sudarymas: misija siekia sukurti didelės raiškos Žemės magnetinio lauko žemėlapius, leidžiančius mokslininkams išsamiai suprasti jo struktūrą ir elgesį. Kiekvienas „Swarm“ palydovas turi daugybę prietaisų, įskaitant magnetometrus, akselerometrus ir GPS imtuvus, skirtus įvairiems Žemės magnetinio lauko aspektams ir susijusiems reiškiniams matuoti. Orbitoje vienu metu turėdama kelis palydovus, misija gali sudaryti trimačius Žemės magnetinio lauko žemėlapius ir stebėti pokyčius laikui bėgant.

Geofizinių procesų analizė: tyrinėdami Žemės magnetinį lauką, mokslininkai gali gauti įžvalgų apie geofizinius procesus, vykstančius giliai planetoje, pavyzdžiui, išlydytos geležies judėjimą išorinėje šerdyje.

Jonosferos ir magnetosferos tyrimai: Swarm palydovai taip pat prisideda prie Žemės jonosferos ir magnetosferos tyrimo, padėdami tyrėjams suprasti sudėtingą saulės vėjo ir Žemės magnetinio lauko sąveiką.

# Palydovo architektūra

Kiekvienas iš trijų „Swarm“ palydovų paleidimo metu svėrė 472 kilogramus, įskaitant 106 kilogramus raketinio kuro. Trys identiški „Swarm“ minipalydovai susideda iš naudingo krovinio ir platformos elementų. Platformą sudaro šie elementai: mechaninė struktūra, elektros galios sistema, RF komunikacijos ėrenginiai, AOCS, šiluminos kontrolės sistema ir duomenų perdavimo sistema. Kiekvienas palydovas yra devynių metrų ilgio, kurio pagrindinis korpusas yra padengtas saulės baterijomis. Palydovą taip pat ssudaro keturių metrų strėlė, ant kurios patalpinti jautrūs magnetinio lauko matavimo prietaisai, atokiau nuo elektrinių ir magnetinių trukdžių. [ref archk 1] Šis erdvėlaivis sukurtas ypatingą dėmesį skiriant magnetinei švarai, magnetinio lauko vektoriaus matavimo tikslumui ir gerai parinktą gravitacijos centro vietą akselerometro matavimams. Kad atitikti šiuos reikalavimus, vektorinis magnetometras buvo sumontuotas ant itin stabilaus silicio karbido ir anglies pluošto junginio optinio stendo, kuris užtikrina aukštą šiluminį stabilumą.



3 pav. „Swarm“ misijos konceptas

[ref archk 1] - <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/swarm_overview.html>

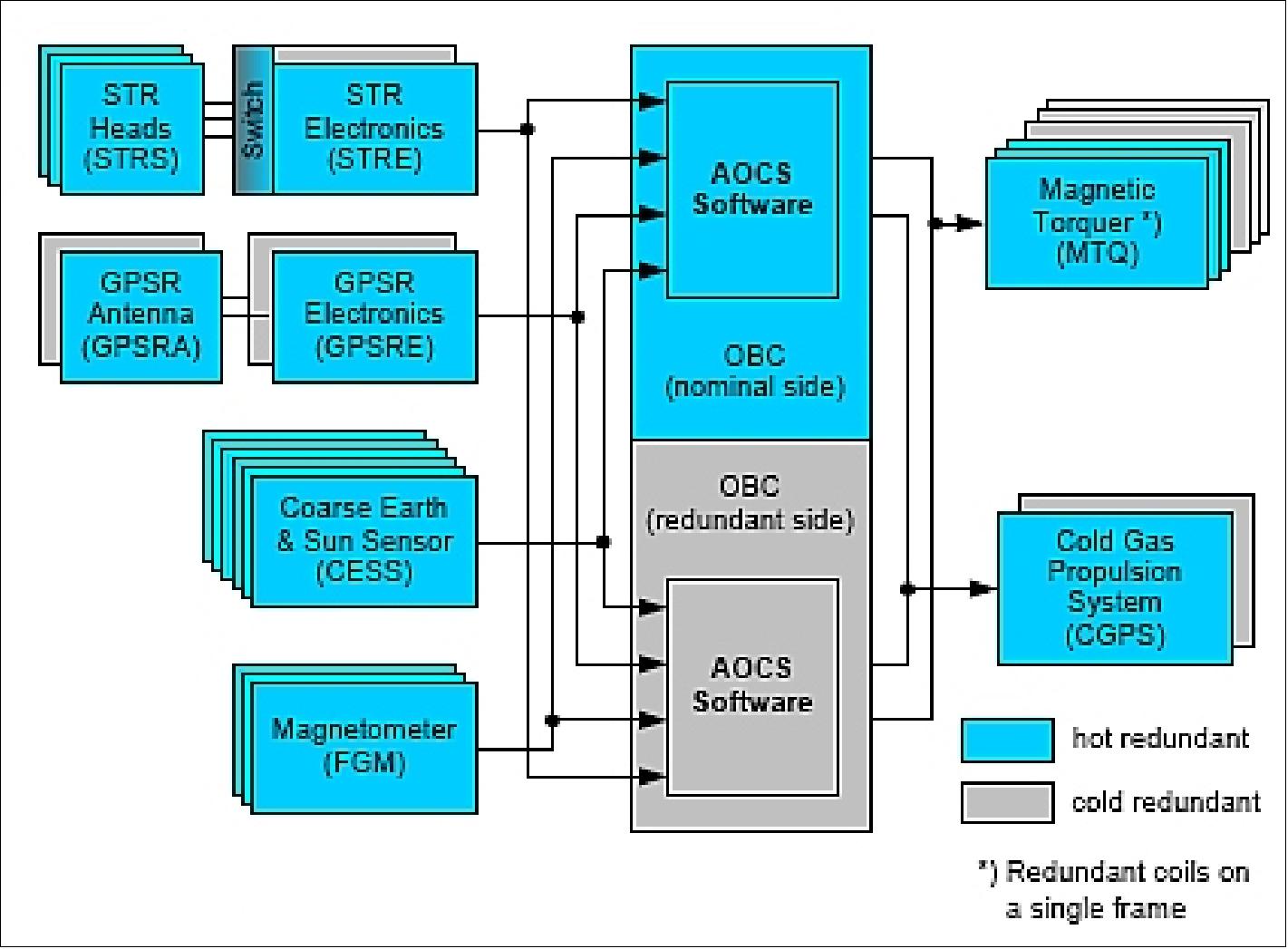
## AOCS sistema

„Swarm“ AOCS (Attitude and Orbit Control System) posistemė yra glaudžiai susijusi su propulsijos sistema, vadinama „Orbit Control“. Palydove tikslius padėties duomenis pateikia žvaigždžių sekimo agregatas, kurį sudaro trys optinės galvutės, trys magnetometrai ir šeši saulės ir žemės jutikliai, naudojami nukreipimui saugiam ir duomenų rinkimo režimu. Dviejų dažnių GPS imtuvas naudojamas teikti tikslią padėties nustatymo paslaugą erdvėlaivio valdymui ir prietaisams, bei tiksliai žymėti matuotus duomenis. Visi jutikliai yra dubliuoti (angl. redundant) architektūroje. Duomenys iš AOCS jutiklių pateikiami AOCS kompiuteriams, kurie įjungia varymo ir padėties valdymo sistemą. Palydovai taip pat aprūpinti keliais prietaisais skirtais stebėti jonosferos plazmos aplinką ir kuo geriau nustatyti palydovų orbitą bei orientaciją (pvz., Global Navigation Satellite Systems-GNSS, lazerinis retroreflektorius).



4 pav. Palydovo architektūra

Pats AOCS dizainas buvo pagrįstas „EADS Astrium“ misijos „CryoSat“ AOCS dizainu. AOCS esanti be giroskopo užtikrina 3 ašių stabilizavimą su Žemės nukreipimo padėties valdymu visais režimais. Palydovas yra galintis užtikrinti: padėties nukreipimo valdymą < 5º juostoje aplink visą ašį (virtimas, nuolydis ir posūkis), nukreipimo stabilumas yra < 0,1º/s.



5 pav AOCS struktūra

AOCS yra glaudžiai sujungta su propulsijos posisteme. Manevrus užtikrina šaltų dujų varymo posistemis, vadinamas OCS (Orbit Control Subsystem), ir magnetiniai sukimo momentai (naudojami ΔV manevrams ir magnetiniams sukimo momentams papildyti. Taip pat palydove yra dviejų dažnių GPS imtuvas (GPSR) naudojamas teikti PPS (tikslios padėties nustatymo paslaugą) OBC ir prietaisus, skirtus duomenims perduoti.

Palydovo greičio slopinimo konstrukcijoje, palaikančiame kritinį erdvėlaivio dislokavimo etapą, naudojamas magnetinio greičio slopinimas – magnetometrai kartu su magnetiniais sukimo momentais ir stūmikliais – kad būtų užtikrintas žymiai pigesnis įgyvendinimas nei naudojant giroskopus. Valdymo teorijos požiūriu greičio slopinimas magnetometrais, naudojant 2 ašių matavimą, yra toks pat saugus, kaip ir naudojant giroskopus.

## Elektros energijos posistemė

EPS (angl. Electrical Power Subsystem): dviem ant korpuso pritvirtintoms saulės kolektorių matricoms ir įvairioms palydovų orbitoms reikalinga MPPT (maksimalaus galios taško sekimo) sistema. Sukurta PCDU (angl. Power Conditioning and Distribution Unit) maitinimo kondicionavimo ir paskirstymo sistema turėjo atitikti šiuos reikalavimus:

* Kuo mažesnis magnetinis momentas, naudojant mažiau magnetinių medžiagų ir srovės kilpų;
* Perjungimo dažnių, esančių „draudžiamų“ diapazonų, naudojimas;
* Saulės panelių įėjimas: nuo 0 iki -125 V, maks. 21 A (vienam skydeliui, 2 plokštės)
* Maksimali plokštės galia: 750 W
* Pagrindinės magistralės įtampos diapazonas: -22 V iki -34 V
* Maksimali akumuliatoriaus įkrovimo srovė: 24 A
* Nuolatinės iškrovos srovė: nuo 0 iki 14 A
* Maksimali iškrovimo srovė/galia 0,5 h: 20 A / 440 W.

## Palydovo komunikacija

S-band komunikacija yra esminė kosminių technologijų dalis, įskaitant ESA "Swarm" palydovus. Ši dažnių juosta (S-band) yra optimali kosminių komunikacijų srityje, nes ji pasižymi geru pralaidumu ir gali perteikti duomenis pakankamai greitai bei patikimai. Šis ryšys leidžia palydovams bendrauti su žemės stotimis ir mainais perduoti įvairių stebėjimų ir matavimų duomenis. Komunikacija per S-band dažnių juostą yra svarbi ne tik dėl duomenų perdavimo, bet ir dėl valdymo ir monitoringo. Palydovų komandos ir valdymo signalai, taip pat palydovo būklės ataskaitos, dažnai naudoja S-band komunikaciją. Tai užtikrina efektyvų ryšį tarp palydovo ir Žemės kontrolės centro, leidžiant kontrolieriams nuolat stebėti palydovo būklę ir būtinai reaguoti į bet kokius nenumatytus įvykius.

Pavyzdžiui, "Swarm" palydovai, naudodami S-band komunikaciją, gali siųsti duomenis apie Žemės magnetinio lauko kitimus. Tai apima informaciją apie magnetinės jėgos stiprumą, kryptį ir kitus svarbius parametrus. Šie duomenys, perduodami per S-band ryšį, ne tik leidžia mokslininkams atlikti nuoseklius stebėjimus, bet taip pat padeda suprasti Žemės magnetinio lauko dinamiką ir galimus priežastinius faktorius. Naudojant šią technologiją palydovai pasiekia 4 kbps išsiuntimo ir 6 Mbpsatsisiuntimo greičius.

Verta painėti, kad nors S-band komunikacija yra efektyvi ir plačiai naudojama, ypač kosminiuose projektuose, kai kurie naujesni palydovai naudoja ir kitas dažnių juostas bei pažangesnes technologijas, siekdami pagerinti ryšio efektyvumą, didinti perdavimo greitį ir užtikrinti didesnį duomenų srautą. Viena iš dažnai naudojamų naujoviškų dažnių juostų kosmoso komunikacijai yra Ka-band ir X-band.

## Pagrindinė naudingoji apkrova (angl. *payload*)

Pagrindinė „Swarm“ misijos užduotis – tiksliai išmatuoti magnetinį lauką atliekama dviem prietaisais – skaliariniu prietaisu strėlės gale, kuris matuoja lauko stiprumą ir vektoriniu instrumentu strėlės viduryje, kuris matuoja lauko kryptį, naudojant žvaigždžių kameras tiksliai orientuoti palydovą. Todėl svarbu detaliai apžvegti šiuos prietaisus ir jų veikimo principus.

### Vector Field Magnetometer

Tie du magnetometrai.

The Vector Field Magnetometer (VFM) carried aboard the Swarm satellites is the primary instrument of the mission. It acquires high-precision measurements of the magnitude and direction of the magnetic field, i.e. the field's vector. The orientation of the vector is determined by the star tracker assembly, which provides attitude data. The VFM and the star trackers (STRs) are both housed on an ultra-stable structure called an optical bench, halfway along the satellite's boom. The instrument was developed and manufactured at the Technical University of Denmark.

In order to obtain accurate measurements, the optical bench that contains the Vector Field Magnetometer had to be designed to keep the instruments aligned to 1 arcsec. This is a high level of stability and posed a challenge to the design team, as the instruments need to withstand huge swings of temperature as the satellites pass in and out of sunlight.

The VFM is a 3-axis Compact Spherical Coil (CSC) with a 3-axis Compact Detector Coil (CDC) inside. The instrument operates as a closed-loop system adjusting the compensating CSC currents to maintain a null field at the detector coils within the sphere. The currents in the CSC coils are measured and digitized (by an ADC) and this constitutes the raw measurements of the instrument.

The CSC Magnetometer is mounted on a Carbon Fiber Reinforced Polymer adapter with extremely high thermal stability while the Camera Head Units are supported by a Carbon-Silicon-Carbon bracket.

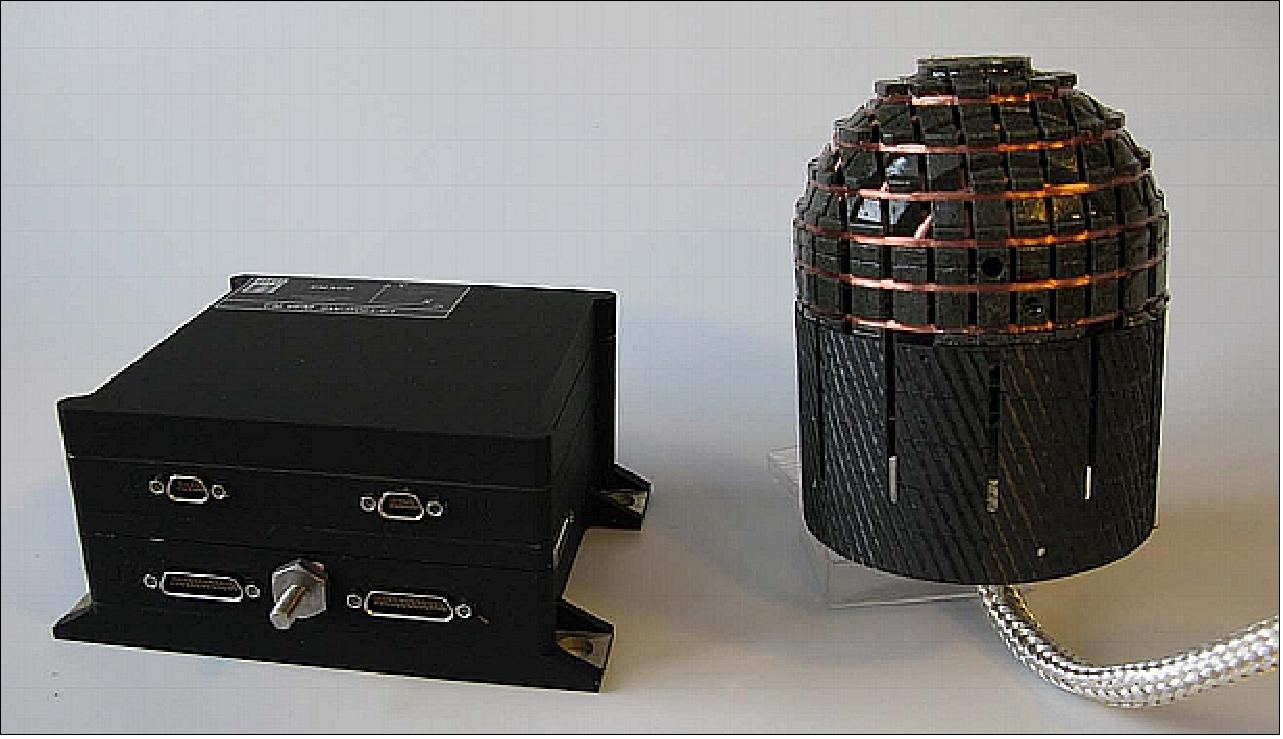
The star sensor is needed to provide extremely accurate attitude measurements that are required for the precise determination of the field vector. Three Camera Head Units are positioned with the boresights 90° from each other so that only one Camera Head is affected by Sun or Moon intrusion at a given time. The Camera Head Units are equipped with a straylight suppression system to minimise thermal excursions from the time varying sun impingement. Attitude data is produced by a micro Advanced Stellar Compass.

The instrument consists of a non-redundant Compact Spherical Coil sensor on the boom, a redundant Data Processing Unit inside the satellite body and the connecting harness featuring a 12-metre cable 8 millimetre in diameter. The Spherical Coil that creates a homogeneous magnetic field is installed on a stable and isotropic mechanical structure. The VFM sensor is held in place by a sliced adapter ring.

The symmetry of the positive and negative magnetic saturation levels of the ferromagnetic sensor core allow the operation of the fluxgate magnetometer by constantly probing the core saturation levels by a high frequency excitation magnetization current that enables the sensor to detect minute deviations from the zero field.

Noise on the instrument is only a few Picotesla while VFM provides a long-term stability in the sub Nanotesla range.

The VFM is an analogue instrument and as such is subject to temporal changes due to radiation and the aging effect of electronics. The effects are only significant in the bias and linear scale parameters of the characterisation; hence these parameters are estimated daily through a comparison of the VFM output with the Absolute Scalar Magnetometer output. Additionally, the non-orthogonality angles of the VFM sensor may also be estimated in this process. The allowed change from day to day in the parameters is controlled group-wise by weight parameters specified in the CCDB. The parameters estimated daily are stored in a Temporal Calibration File (TCF) as an auxiliary data product.



VFM (Vector Field Magnetometer)

VFM is the prime instrument of the Swarm mission developed at DTU Space. The objective is to measure the magnetic field vector, on the boom, together with the star tracker for precise attitude measurement. The boom mounted Swarm vector magnetometer instrument consist of a triple star sensor block and a CSC (Compact Spherical Coil) vector magnetometer sensor, mounted on a stable optical bench (Figure 8). Each satellite contains the optical bench with one CSC and three CHU (Camera Head Unit). 134) 135) 136)

The three star sensor units are arranged with the boresights 90º from each other so as to ensure that only one CHU may be affected by Sun or Moon intrusion at any given time. Hereby an attitude solution accurate in all three degrees of freedom can be delivered to the CSC throughout the entire mission. The CSC sensor and the triple star sensor block are mounted on either end of a highly stable mechanical structure.

The CSC vector sensor is supported by a zero CTE (Coefficient of Thermal Expansion) CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) adapter that on the one end matches the zero CTE CFRP tube, used to displace the CSC sensor from the star sensor heads (CHU), and on the other end matches the 32 ppm CTE CSC sensor, by means of a finger section. The rotational symmetry of this design ensures an excellent angular stability.

The other end of the CFRP tube is attached to a CSiC bracket holding the three CHUs. The CSiC exhibit a heat distribution capacity second to none, minimizing thermal biases of this section, from the inevitable thermal gradient induced when the sun happens to illuminate any of the three CHUs. Because the CSiC is weakly magnetic, this material can only be used at distances larger than 20 cm from the CSC sensor.

Each CHU is fitted with a straylight suppression system that is thermally decoupled from the optical bench. This separation minimizes thermal excursions from the time varying sun impingement over an orbit to less than a few degrees C. The straylight suppression system is mechanically mounted on an external thermal CFRP shroud, which also provides for thermal control of the entire optical bench. The material selection for all thermal protection has been performed to suppress soft or hard magnetic parts as well as parts that can generate magnetic fields under thermal gradients.

VFM instrument: The VFM (fluxgate type) is based on the fluxgate transducer using a ringcore with amorphous magnetic material, which has a very low noise (10-20 pT rms). It has an extremely high stability < 0.05 nT/year. VFM consists of a CSC (Compact Spherical Coil) sensor, non redundant, mounted on the deployable boom, an internally redundant data processing unit (DPU) and the connecting harness. The spherical coils that create a homogeneous vector field inside the sphere are mounted on an isotropic and extremely stable mechanical support. In feedback conditions the sensor is used as a nulling device and the coils define uniquely the magnetic axes of the sensor. The VFM exhibits high linearity (< 1ppm), a component accuracy of 0.5 nT and precision of 50 pT rms.

The operation of the fluxgate sensor is based on the extreme symmetry of the positive and negative magnetic saturation levels of the ferromagnetic sensor core material. Continuous probing of the core saturation levels by a high frequency excitation magnetization current enables the sensor to detect deviations from the zero field with only tens of pT noise and sub-nT long term stability.

The mounting of the VFM sensor is using a sliced adaptor ring. The optical bench ensures mechanical stability of the system. Three star trackers provide full accuracy attitude.

• VFM (Vector Field Magnetometer): The VFMs are healthy and producing data at 50 Hz in all three spacecraft.

### Absolute Scalar Magnetometer

Kaip veikia magnetometer

Vector Field Magnetometer (VFM) and the Absolute Scalar Magnetometer (ASM) placed at the middle and at the end of a four-meter boom, respectively

In this work, we analysed the data of the Vector Field Magnetometer (VFM) and the Absolute Scalar Magnetometer (ASM) placed at the middle and at the end of a four-meter boom, respectively, both located at the back of each satellite. ESA downloads the raw data from Swarm satellites to the Kiruna and Svalbard stations and processes them in almost real-time (with a delay of 3–4 days only).

Labai detaliai is magsat- https://www.eoportal.org/other-space-activities/magsat#references

## Modeliai ir skaičiavimai

Kadangi sukurti realias

# Realūs panaudojimai

Detaliau šiame darbe yra

## Pavyzdys

Furthermore, the Swarm Bravo satellite, i.e., that one at highest orbit, passed above the epicentral area 15 min before the earthquake and detected an anomaly mainly in the Y component. These analyses applied to the Ridgecrest earthquake not only intend to better understand the physical processes behind the preparation phase of the medium-large earthquakes in the world, but also demonstrate the usefulness of a satellite constellation to monitor the ionospheric activity and, in the future, to possibly make reliable earthquake forecasting.

In order to extract magnetic anomalies possibly related to the major seismic events, we need to remove the main magnetic field. We then apply an approach successfully used in previous works and well described in the Methods section of [15] under the name of the MASS (MAgnetic Swarm anomaly detection by Spline analysis) algorithm.

------------------------

1. Navigation and Satellite Technology: Precise knowledge of the Earth's magnetic field is essential for navigation and the operation of satellites. It allows for accurate navigation systems and helps mitigate the effects of magnetic anomalies on satellite instruments.

Ionospheric and Magnetospheric Studies: The Swarm mission contributes to the study of the Earth's ionosphere and magnetosphere. These regions are influenced by the Earth's magnetic field and play a crucial role in the interaction between the Earth and the solar wind.

## Duomenys

The Agency provides calibrated magnetic open access data at Level 1b, where the measurements are provided not only in the instrumental frame but are also oriented in the Earth frame system NEC (North, East, Centre) at the original sampling frequency of 50 Hz (HR = High Resolution) and resampled at 1 Hz at the GPS o’clock seconds (LR = Low Resolution).

Misijos duomenys yra viesai pasiekiami

<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.5047/eps.2013.07.011>

Space Weather: The Earth's magnetic field interacts with the solar wind, and this interaction can influence space weather phenomena. Space weather events, such as solar flares and geomagnetic storms, can impact satellite operations, communication systems, and power grids on Earth. Studying the Earth's magnetic field helps in better understanding and predicting space weather.

Nauojami space weather aptikimams kad galima butu isjungti satus kitus:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-022-00916-0#Sec8>

kazkiok github gal API:

<https://github.com/klaundal/pyAMPS>

<https://earth.esa.int/eogateway/tools/vires-for-swarm>

Išvados

1. Darbe apžvelgti magnetinio lauko tyrinėjimo problematika ir kiti metodai
2. Išanalizuota, kad
3. Detaliai išanalizuoti
4. Pateiktos palydovus kuriančios

Literatūros sąrašas

1. CubeSat101 Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers. Prieiga per: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa\_csli\_cubesat\_101\_508.pdf
2. Dubos, G.F., Castet, J.F. and Saleh, J.H., 2010. Statistical reliability analysis of satellites by mass category: Does spacecraft size matter?. Acta Astronautica, 67(5-6), pp.584-595. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576510001347
3. Langer, M. and Bouwmeester, J., 2016. Reliability of CubeSats-statistical data, developers' beliefs and the way forward. Prieiga per: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2016/TS10AdvTech2/4/
4. Bouwmeester, J., Menicucci, A. and Gill, E.K., 2022. Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing?. Reliability Engineering & System Safety, 220, p.108288 Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021007584
5. Dobiáš, P., Casseau, E. and Sinnen, O., 2021. Improving the CubeSat reliability thanks to a multiprocessor system using fault tolerant online scheduling. Microprocessors and Microsystems, 85, p.104312. Prieiga per:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141933121004737

1. STM32 ECC dokumentacija. Prieiga per:

https://www.st.com/resource/en/application\_note/an5342-error-correction-code-ecc-management-for-internal-memories-protection-on-stm32h7-series-stmicroelectronics.pdf