



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Semestro projektas

## **ESA spiečiaus palydovai**

Inovatyvios matavimo sistemos (T110M007)

---

**Žygimantas Marma**

Studentas

**Prof. Darius Gailius**

Dėstytojas

---

**Kaunas, 2023**

## **Turiny**

<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>3</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>4</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Kosmoso palydovai.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Palydovo architektūra.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Misijos rezultatai .....</b>	<b>16</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>19</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>20</b>

## **Paveikslų sąrašas**

1 pav. „MagSat“ palydovo architektūra .....	7
2 pav. Realūs „Swarm“ palydovai .....	8
3 pav. „Swarm“ misijos konceptas .....	10
4 pav. Palydovo architektūra .....	11
5 pav. AOCS struktūra .....	11
6 pav. Swarm palydovų duomenų apdorojimo blokas (kairėje) ir fluxgate tipo vektorinis lauko magnetometras (dešinėje) .....	13
7 pav. Absoliutinis skaliarinis magnetometras .....	15
8 pav. Swarm misijos duomenų vizualizacijos .....	18

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

ESA – Europos kosmoso agentūra (angl. *European Space Agency*)

NASA – Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija (angl. *National Aeronautics and Space Administration*)

AOCS – Pokrypio bei orbitos valdymo sistema (angl. *Attitude and Orbit Control System*)

VFM – Vektorinio lauko magnetometras (angl. *Vector Field Magnetometer*)

ASM – Absoliutinis skaliarinis magnetometras (angl. *Absolute Scalar Magnetometer*)

### Terminai:

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

**Arksekundė (angl. *arcsecond*)** – dydis lygus trisdešimt šešių šimtų lanko laipsnių ( $1^\circ/3600$ ). Radianais (SI vienetas) tai yra  $\pi/648000$  rad arba apytiksliai  $4,848137 \cdot 10^{-6}$  rad.

## Ivadas

Magnetizmo tyrinėjimai datuojami maždaug 110 prieš Kristų, kai kinai išrado anksčiausią magnetinį kompasą. Stebėdami magnetitą – gamtoje susidarančių magnetų su turtinga geležies rūda – elgseną, jie išsiaiškino, kad pakabinti, laisvai suktis, šie akmenys nuolat nukrypavo ta pačia kryptimi – magnetinių polių link. Ši pagrindinė savybė tapo neatskiriama ankstyvojo kompasų kūrimo dalimi, sukėlusią revoliuciją jūrų navigacijoje. Iki XIII amžiaus magnetinių savybių naudingumas navigacijoje buvo plačiai pripažintas, o jūreivių magnetinis kompasas buvo vienas iš ankstyviausių magnetizmo pritaikymų ir vienas seniausių mokslinių instrumentų.

Iki 1820 m. žinomos magnetizmo formos apsiribojo geležiniais magnetais ir akmenimis. 1820 m. danų fizikas Hansas Christianas Ørstedas, Kopenhagos universiteto profesorius, atskleidė ryšį tarp anksčiau atskirtų elektros ir magnetizmo sferų. Ørstedas įrodė, kad elektros srovė, einanti per laidą, gali nukreipti kompasų adatą, prieš Faradėjaus suformuluotą dėsnį, kuris dabar vadinamas jo vardu: sukuriama magnetinis laukas yra proporcingas srovės intensyvumui. Iš šių atradimų atsirado statinių magnetinių laukų, žinomų kaip magnetostatika, mokslo sritis.

Magnetiniai ir elektriniai laukai kartu sudaro du elektromagnetizmo aspektus. Elektromagnetinės bangos gali skleisti erdvę ir daugumą medžiagų plačiam dažnių spektre. Kaip pavyzdžiui radijo bangas, mikrobangas, infraraudonuosius spindulius, matomą šviesą, ultravioletinę šviesą, rentgeno spindulius ir gama spindulius. Elektromagnetiniai laukai sujungia gamtines jėgas, tokias kaip Žemės magnetinis laukas, su žmogaus sukurtomis jėgomis, apimančias žemo dažnio programas, tokias kaip elektros perdavimo linijos ir kabeliai, taip pat aukštesnius radijo bangų (įskaitant mobiliuosius telefonus) ir televizijos laidų dažnius.

Būtent todėl žemės magnetinis laukas yra be galo svarbus. Šiandien, tyrinėdami Žemės magnetinio lauko paslaptis ir jos įtaką mūsų planetai, negalime nepasigilinti į Europos kosmoso agentūros (ESA) inovatyvią misiją – 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 misija, jos tikslai bei duomenų rinkimo metodika. Be to, darbe yra aptariama 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.

## 1. 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.

### 1.1. 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.

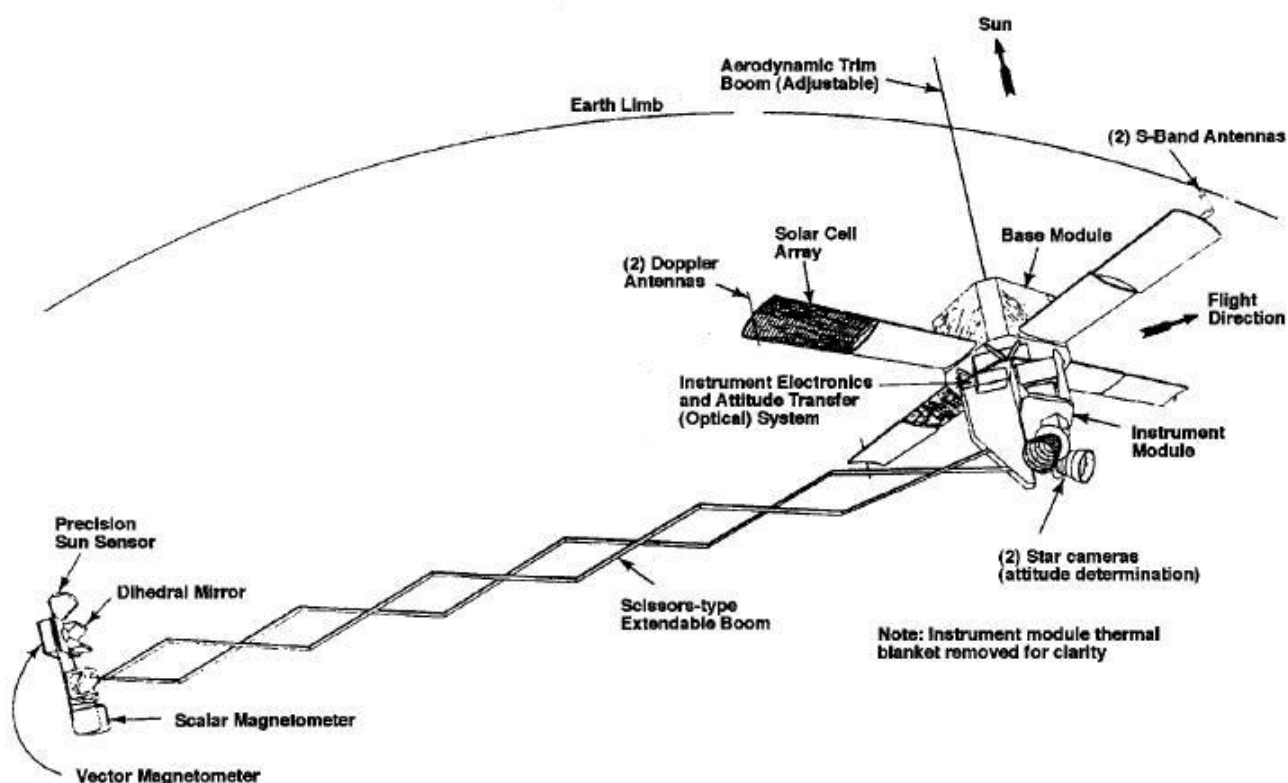
ESA yra žinoma dėl įvairių sėkmingų kosmoso misijų, kurios apima palydovų siuntimus, tarptautinius kosminius stoties projektus ir kitus ambicingus tyrimus. Misijos yra kuriamos siekiant atsakyti į įvairius mokslinius klausimus, suprasti kosmoso reiškinius ir pritaikyti kosminę technologiją žmogaus naudai. 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.

#### 1.1.1. 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 žemėlapių bei sudaryti tikslius geologinius/geofizinius žemės plutos modelius.

Pagrindinei misijai – nustatyti Žemės magnetinį lauką, palydovas naudoko du magnetometrus. Skaliariniai (cezio garais pagrįstą) ir vektoriniai magnetometrai suteikė „Magsat“ daugiau galimybių nei bet kuris ankstesnis erdvėlaivis [1]. Pasitelkiant išsiplečiančią teleskopinę strėlę, magnetometrai buvo nutolę nuo palydovo ir jo elektronikos sukurtą magnetinio lauko. Palydovas turėjo du magnetometrus: trijų ašių „fluxgate“ magnetometrą, skirtą magnetinių laukų stiprumui ir kryptį nustatyti, ir jonų garų/vektoriaus magnetometrą, skirtą paties vektorinio magnetometro sukurtam magnetiniam laukui nustatyti. „Magsat“ laikomas vienu iš svarbesnių mokslo ir žemės orbitoje skriejančių palydovų; jo sukaupiti 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 posistemėmis 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.

## 1.2. 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 išvalgas 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 išvalgų 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, akcelerometrus 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.

## 2. 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, šiluminės kontrolės sistema ir duomenų perdavimo sistema. Kiekvienas palydovas yra devynių metrų ilgio, kurio pagrindinis korpusas yra padengtas saulės baterijomis. Palydovą taip pat sudaro keturių metrų strėlė, ant kurios patalpinti jautrūs magnetinio lauko matavimo prietaisai, atokiau nuo elektrinių ir magnetinių trukdžių. [2] Šis erdvėlaivis sukurtas ypatingą dėmesį skiriant magnetinei švarai, magnetinio lauko vektorių matavimo tikslumui ir gerai parinktą gravitacijos centro vietą akselerometro matavimams. Kad atitiktų šiuos reikalavimus, vektorinis magnetometras buvo sumontuotas ant itin stabilaus silicio karbido ir anglies pluošto junginio optinio stendo, kuris užtikrina aukštą šiluminį stabilumą.

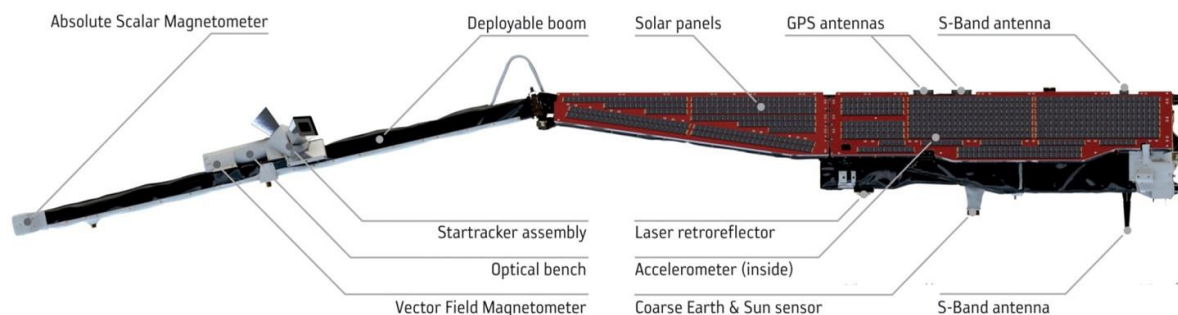


3 pav. „Swarm“ misijos konceptas

### 2.1. AOCS sistema

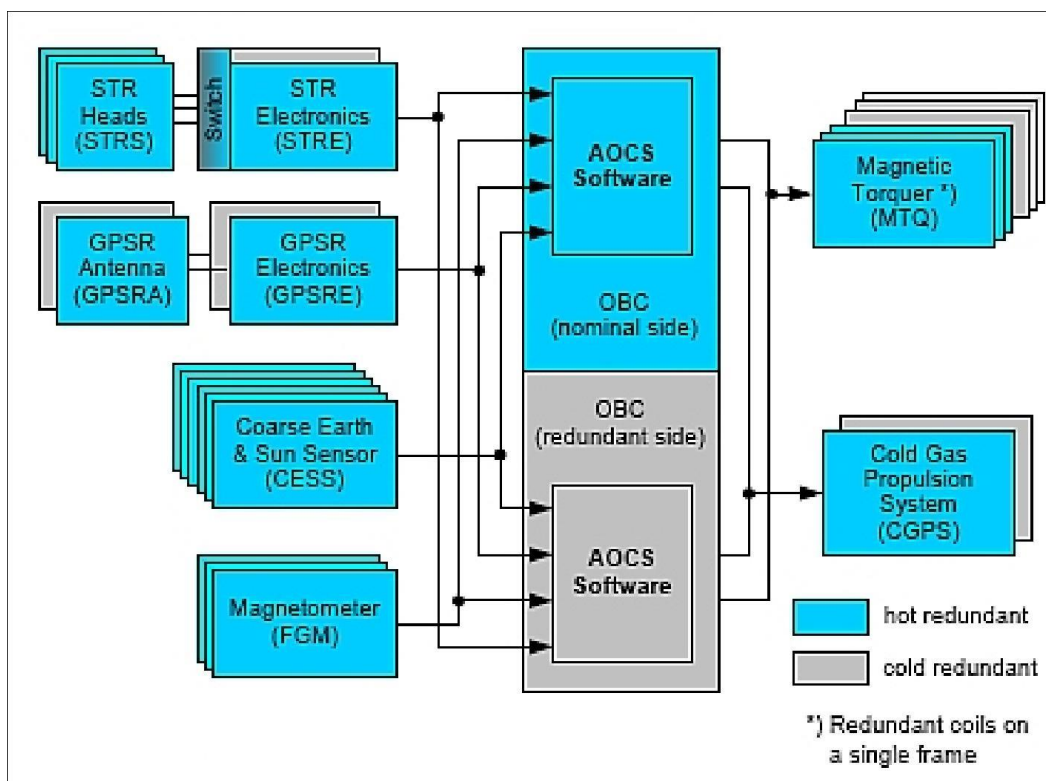
„Swarm“ AOCS (Attitude and Orbit Control System) posistemė yra glaudžiai susijusi su propulsijos sistema, vadinama „Orbit Control“. Palydove tikslūs padėties duomenis pateikia žvaigždžių sekimo agregatas, kurį sudaro trys optinės galvutės, trys magnetometrai ir šeši saulės ir žemės jutikliai, naudojami nukreipimui saugiam ir duomenų rinkimo režimu. Dviejų dažnių GPS imtuvai naudojami 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  $< 5^\circ$  juostoje aplink visą ašį (virtimas, nuolydis ir posūkis), nukreipimo stabilumas yra  $< 0,1^\circ/\text{s}$ .



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  $\Delta V$  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.

## 2.2. 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.

## 2.3. 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 Mbpsatsiuntimo greičius.

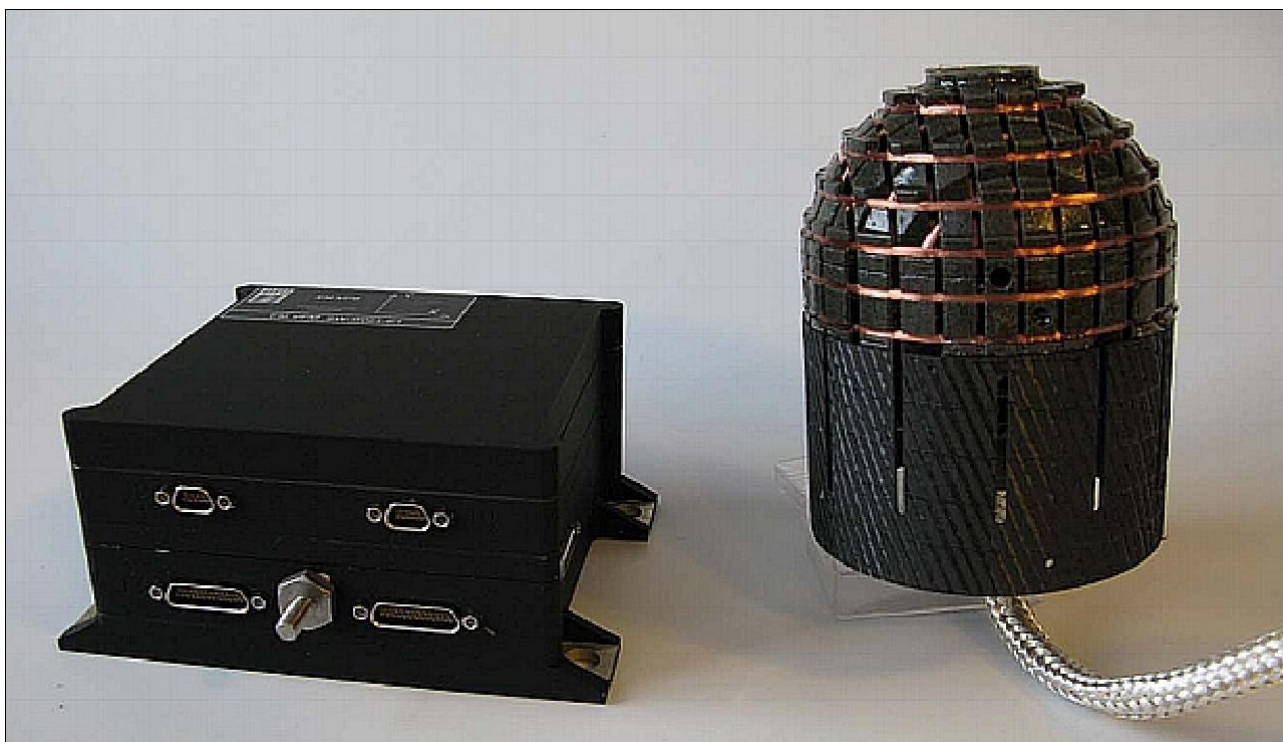
Verta paminėti, kad nors S-band komunikacija yra efektyvi ir plačiai naudojama, ypač kosminiuose projektuose, kai kurie naujesni palydovai naudoja ir kitas dažnių juostas bei pažangesnes technologijas, siekdami pagerinti ryšio efektyvumą, didinti perdavimo greitį ir užtikrinti didesnę duomenų srautą.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

## 2.4. Pagrindinė matavimo sistema

Magnetometras tai yra prietaisas, naudojamas magnetiniam laukui matuoti – jo magnetinio stiprumo ir orientacijos sužinojimui. Populiarus magnetometro pavyzdys būtų kompasas, naudojamas aplinkos magnetinio lauko (ty šiuo atveju žemės magnetinio lauko) kryptiai matuoti. Taip pat ir 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 detalai apžvelgti šiuos prietaisus ir jų veikimo principus.

### 2.4.1. Vektorinis lauko magnetometras

„Swarm“ palydovuose esantis vektorinis lauko magnetometras (angl. Vector Field Magnetometer – VFM) yra pagrindinis misijos instrumentas. Jis išgauna didelio tikslumo magnetinio lauko (lauko vektoriaus) dydžio ir krypties matavimus. Vektoriaus orientaciją nustato žvaigždžių sekimo agregatas sudarytas iš trijų optinių galvų, kuris pateikia padėties duomenis. Tiek VFM, tiek žvaigždžių sekimo įrenginiai (STR) yra ant itin stabilios konstrukcijos, vadinamos optiniu stendu, palydovo strėlės viduryje. Šis prietaisas buvo sukurtas ir pagamintas Danijos technikos universitete. Žvaigždžių sekikliai yra reikalingi norint atlikti itin tikslūs padėties matavimus, kurių reikia norint tiksliai nustatyti lauko vektorių. Trys kameros galvutės blokai yra išdėstyti taip, kad matavimai būtų  $90^\circ$  vienas nuo kito, kad vienu metu saulės arba mėnulio įsiskverbimo paveiktų tik vieną kameros galvutę. Kameros galvutėse yra šviesos slopinimo sistema, kuri sumažina šiluminius poslinkius, atsirandančius dėl kintančio saulės poveikio.



6 pav. Swarm palydovų duomenų apdorojimo blokas (kairėje) ir fluxgate tipo vektorinis lauko magnetometras (dešinėje)

Norint gauti tikslūs matavimus, optinis stendas, kuriame yra vektoriaus lauko magnetometras, turėjo būti suprojektuotas taip, kad prietaisai būtų išlyginti iki arksekundės. Tai yra aukšto lygio stabilumas

ir buvo iššūkis projektavimo komandai, nes instrumentai turi atlaikyti didžiulius temperatūros svyravimus, kai palydovai patenka į saulės šviesą ir išeina iš jos. Prietaisą sudaro neperteklinis kompaktiškos sferinės ritės (angl. *Compact Spherical Coil*) jutiklis ant strėlės, perteklinis duomenų apdorojimo blokas palydovo korpuse ir jungiamoji juosta su 12 metrų ilgio ir 8 milimetrų skersmens kabeliu. Sferinė ritė, kuri sukuria homogeninį magnetinį lauką, sumontuota ant stabilios ir izotropinės mechaninės konstrukcijos. Patį VFM jutiklį laiko perpjautas adapterio žiedas.

VFM (fluxgate tipo) yra pagrįstas **fluxgate** keitikliu, naudojančiu žiedinę šerdį su amorfine magnetine medžiaga, kuri turi labai mažą triukšmą (10-20 pT rms). Jis pasižymi itin dideliu stabilumu  $< 0,05$  nT/metai. VFM sudaro neperteklinis CSC (Compact Spherical Coil) jutiklis, sumontuotas ant išskleidžiamos strėlės, vidinio perteklinio duomenų apdorojimo bloko (DPU) ir jungiamojo laido. Sferinės ritės, sukuriančios vienalytį vektorinį lauką sferos viduje, yra sumontuotos ant izotropinės ir itin stabilios mechaninės atramos. Grįžtamojo ryšio sąlygomis jutiklis naudojamas kaip nulinis įtaisas, o ritės vienareikšmiškai apibrėžia jutiklio magnetines ašis. VFM pasižymi dideliu tiesiškumu ( $< 1$ ppm), komponento tikslumas yra 0,5 nT ir 50 pT kvadratinės vertės tikslumas. VFM duomenis gauna 50 Hz dažniu visuose trijuose identiškuose erdvėlaiviuose.

Feromagnetinio jutiklio šerdies teigiamo ir neigiamo magnetinio prisotinimo lygių simetrija leidžia veikti fluxgate magnetometrui, nuolat tikrinant šerdies prisotinimo lygius aukšto dažnio sužadinimo įmagnetinimo srove, kuri leidžia jutikliui aptikti nedidelius nukrypimus nuo nulinio lauko. Prietaiso triukšmas yra tik kelio pikoTeslos, o VFM užtikrina ilgalaikį stabilumą nanoTeslų diapazone.

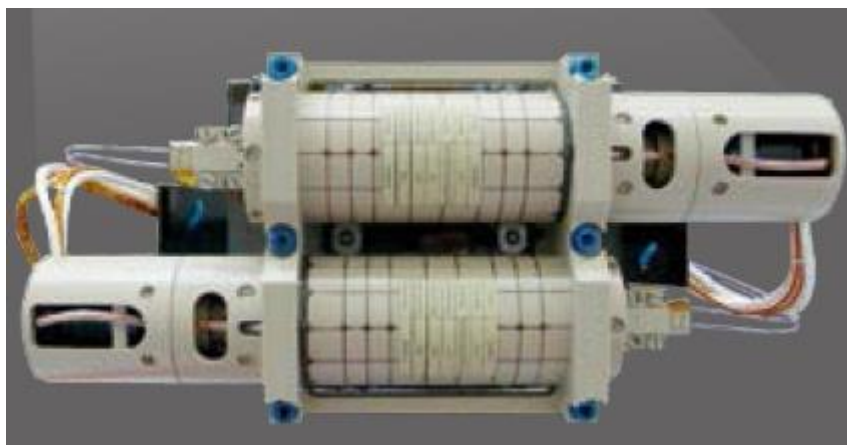
Taigi, pagrindinis šio preitaiso principas yra fluxgate magnetometras veikia naudodamas feromagnetinę šerdį, paprastai pagamintą iš tokių medžiagų kaip nikelio ir geležies lydinio, apsupto sužadinimo ritėmis, kurios naudoja kintamąją srovę, sukeldamos histerezės kilpą šerdies įmagnetinimo charakteristikose. Paėmimo ritės aptinka magnetinio srauto pokyčius šerdyje, kai jis prisisotina ir mažėja. Veikiant išoriniam magnetiniam laukui, histerezės kilpa tampa asimetriška, o paėmimo ritės generuoja išėjimo signalą, kurio amplitudė atspindi išorinio lauko stiprumą. Naudojant keletą skirtingų orientacijų ritinių, fluxgate magnetometras taip pat gali nustatyti magnetinio lauko kryptį.

#### 2.4.2. Absoliutinis skaliarinis magnetometras

Swarm palydovuose esantis absoliutinis skaliarinis magnetometras (angl. Absolute Scalar Magnetometer – ASM) matuoja magnetinio lauko stiprumą tiksliau nei bet kuris kitas magnetometras. Jis suteikia magnetinio lauko skaliarinius matavimus, kad būtų galima kalibruoti vektorinio lauko magnetometrą. Dėl ASM charakteristikų prietaisas idealiai tinka ne tik tradiciniam panaudojimui, kaip absoliučios atskaitos matavimu kalibruojant įvairius vektorinius prietaisus, bet ir išplėstiniais veikimo pajėgumams, pvz., aukštesnio dažnio skaliariniams matavimams (galimai magnetosferai), žemo dažnio spektro dalies tyrimai arba autonominės skaliarinės / vektorinės operacijos. Be to, helio magnetometras gali būti naudojamas nulinio lauko konfigūracija su labai nedideliais jutiklio bendro dizaino pokyčiais, taip praplečiant jo pradines galimybes naujoms planetų tyrinėjimo misijoms.

ASM instrumentas susideda iš duomenų apdorojimo bloko (DPU) ir jutiklio bloko, prijungtas prie DPU optiniais kabeliais ir elektros kabeliais. Du identiški jutikliai yra sumontuoti ant išskleidžiamos strėlės galo, kad sistema, kuri taip pat turi du DPU – po vieną kiekvienam jutikliui, būtų perteklinė. DPU sudaro du sudėti moduliai.





7 pav. Absoliutinis skaliarinis magnetometras

ASM yra pagrįstas elektronų sukimosi rezonanso principu ir naudoja *Zeeman* efektą, kuris padalija atomų emisijos ir sugerties linijas aplinkos magnetiniame lauke. Skilimo modelis ir dydis yra magnetinio lauko stiprumo ženklas. Optiškai pumpuojamas helio magnetometras naudoja aukšto dažnio (HF) iškrovą dujų elemente, kad sužadintų  $4\text{He}$  atomus iš pagrindinės būsenos į metastabilią būseną. Šį metastabilų lygį Žemės magnetinis laukas padalija į tris Zeeman sublygius. Tų polygių atskyrimas yra tiesiogiai proporcingas aplinkos lauko stiprumui ir yra lygus pusei giroskopo dažnio ( $eB/2m$  – čia  $m$  yra elektrono masė). Naudojant šį matavimo principą, ASM gali nustatyti magnetinio lauko stiprumą su dideliu jautrumu ir našumu, kuris išlieka identiškas visuose orbitos taškuose. ASM atlieka absoliučius matavimus be jokio nukrypimo ar šališkumo. ASM taip pat gali nustatyti magnetinio lauko komponentus išilgai trijų ašių, statmenų viena kitai, todėl gaunami magnetinio lauko vektoriaus matavimai, kuriuos galima naudoti vektorinio lauko magnetometro ir ASM duomenų palyginimui, kad būtų galima patikrinti ASM jutiklio konstrukciją būsimoms misijoms.

ASM veikia su tiesiškai poliarizuotais šviesos spinduliais, o ne su žiedine poliarizuota šviesa. Pagrindinės tokio pasirinkimo priežastys yra šios:

Stipri sąveika tarp lazerio spindulio pluošto ir helio atomų gali paveikti jų energijos lygį ir sukelti vadinamuosius šviesos poslinkius, kai skleidžiamos šviesos bangos ilgis nukrypsta nuo helio perėjimo centro bangos ilgio. Tuo tarpu tiesiškai poliarizuotos šviesos naudojimas slopina šį efektą ir taip žymiai padidina instrumento tikslumą.

Pagrindinis parametras, reguliuojantis optinio sklaidimo kampinę priklausomybę, yra lazerio poliarizacijos kryptis. Taigi, bandant sukurti izotropinį instrumentą, t. y. instrumentą, kurio veikimas nepriklauso nuo jutiklio padėties, akivaizdu, kad lengviau valdyti tiesinės poliarizacijos kryptį, nei pasukti visą jutiklį, kad jis būtų tinkamai suderintas magnetinio lauko krypties atžvilgiu. Taigi šiuo atveju izotropija pasiekama naudojant magnetinį pjezoelektrinį variklį, kuris nuolat kontroliuoja lazerio poliarizaciją ir RF magnetinio lauko kryptis, kad jos būtų statmenos statiniam magnetiniam laukui.

### 3. Misijos rezultatai

Swarm misija buvo planuota veikti ketverius metus po trijų mėnesių paleidimo etapo. 2017 m. lapkritį misija buvo pratęsta ketveriems metams iki 2021 m. Vėliau ji buvo pratęsta ir veiks iki 2025 m. 2018 m. kovo mėn. misija CASSIOPE/e-POP buvo oficialiai integruota į Swarm palydovų spiečių kaip ketvirtasis elementas (Swarm-E) pagal ESA Earthnet trečiosios šalies misijos programą. Šiuo metu e-POP naudingosios apkrovos operacijos yra skirtos maksimaliai padidinti „Swarm“ / „e-POP“ mokslinius rezultatus ir nuolat dedamos bendros pastangos kuriant naujus ir geriau sukalibruotus produktus, pagrįstus „e-POP“ duomenimis.

ESA atsisiunčia neapdorotus duomenis iš Swarm palydovų į Kirunos ir Svalbardo stotis ir apdoroja juos tik su 3–4 dienų vėlavimu. Šie duomenys ir yra pagrindiniai misijos rezultatai bei tapo labai svarbūs moksliniams tyrimams.

#### 3.1. Misijos panaudojimai

Pagrindiniai misijos panaudojimai buvo magnetinio lauko anomalijų ir „kosmoso oro“ srityse. Norint išgauti magnetines anomalijas, galbūt susijusias su pagrindiniais seisminiais įvykiais, privaloma pašalinti pagrindinio magnetinio lauko dedamąją. Tada taikome metodą, sėkmingai naudotą ankstesniuose darbuose, pavadinimu MASS (angl. *MAGnetic Swarm anomaly detection by Spline analysis*). Būtent šiems matavimams ir buvo panaudoti duomenys gauti ESA swarm misijos metu. Todėl šios žinios apie Žemės magnetinį lauką yra būtinos navigacijai ir palydovų veikimui. Tai leidžia sukurti tikslias navigacijos sistemas ir padeda sušvelninti magnetinių anomalijų poveikį palydoviniams instrumentams.

Kitas Swarm misijos rezultatas buvo prisidėjimas prie Jonosferos ir magnetosferos tyrimų. Šie regionai yra veikiami Žemės magnetinio lauko ir atlieka lemiamą vaidmenį Žemės ir saulės vėjo sąveikoje. Swarm žvaigždynas žymiai pagerino mūsų supratimą apie jonosferą. Jis ima jonosferos plazmos mėginius buvimo vietoje, taip pat geba numanyti srovės sistemas, termosferos tankius ir plazmos struktūras spindulių keliuose tarp GPS ir Swarm palydovų. Visi šie stebėjimai leidžia geriau modeliuoti ir, galbūt, numatyti jonosferos elgseną ir jos sąveiką su kitais Žemės sistemos komponentais. Vis daugėja su kosminiu oru susijusių straipsnių, pagrįstų „Swarm“ duomenimis.

Be to, „Swarm Bravo“ palydovas, ty esantis aukščiausioje orbitoje, pralėkė virš epicentrinės zonos likus 15 minučių iki žemės drebėjimo ir aptiko anomaliją daugiausia Y komponente. Šiomis Ridgecrest žemės drebėjimui pritaikytomis analizėmis siekiama ne tik geriau suprasti fizinius procesus, vykstančius ruošiantis vidutinio dydžio žemės drebėjimams pasaulyje, bet ir parodyti palydovinio žvaigždyno naudingumą jonosferos aktyvumui stebėti ir ateityje, kad būtų galima patikimai prognozuoti žemės drebėjimus.

#### 3.2. Atviri misijos duomenys

Misijos duomenys yra viesai pasiekiami, suos sudaro kokybiški, sukalibruoti ir pataisytų matavimų laiko eilutės, pateiktos fiziniiais, SI vienetais geografiškai lokalizuotuose atskaitos rėmuose. Šie duomenys pateikiami atskirai kiekvienam iš trijų palydovų Swarm A, Swarm B ir Swarm C kasdien. GPS imtuvo duomenų produktas apima pseudo diapazono ir nešiklio fazės stebėjimus. Magnetiniuose rinkiniuose yra dviejų magnetometrų atlikti matavimai (papildyti padėtimi ir palydovo orientacija, išmatuota žvaigždžių sekimo prietaisu), o plazminiuose rinkiniuose yra duomenys, gauti naudojant terminio jonų vaizdo įrenginį ir Langmuir zondą [3].

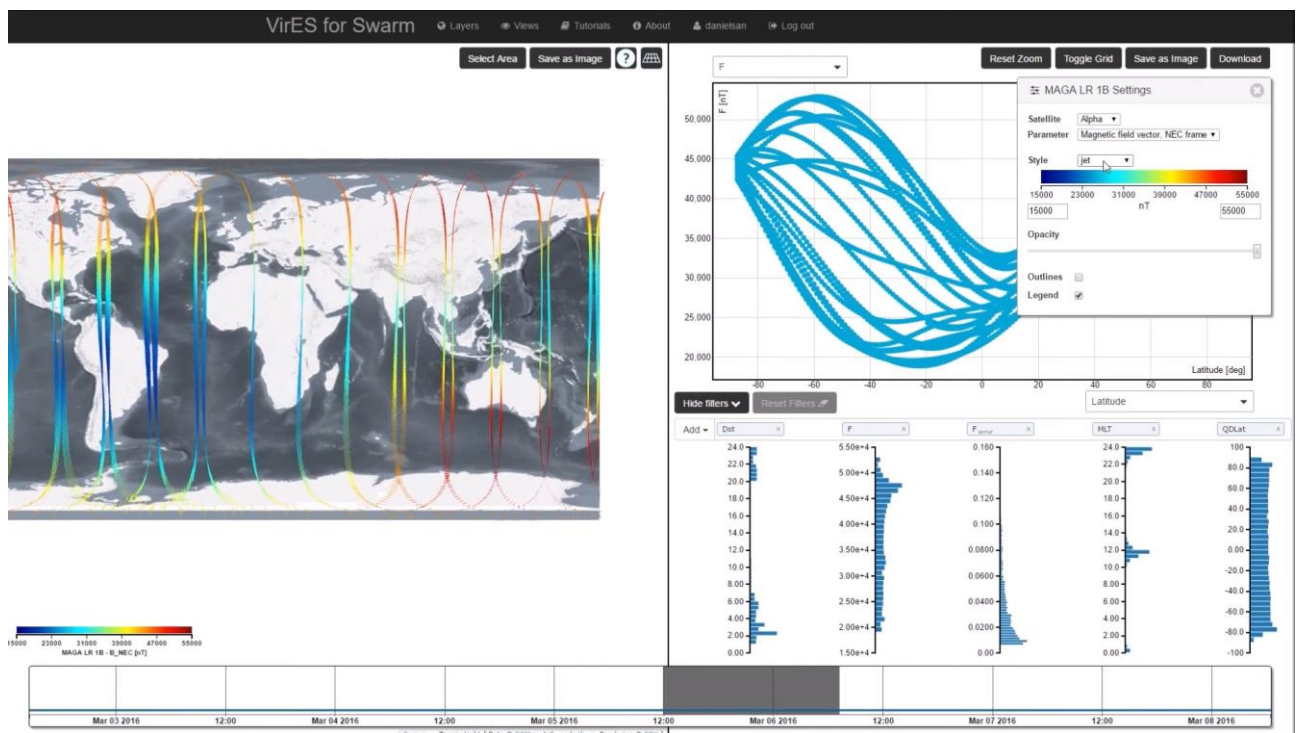
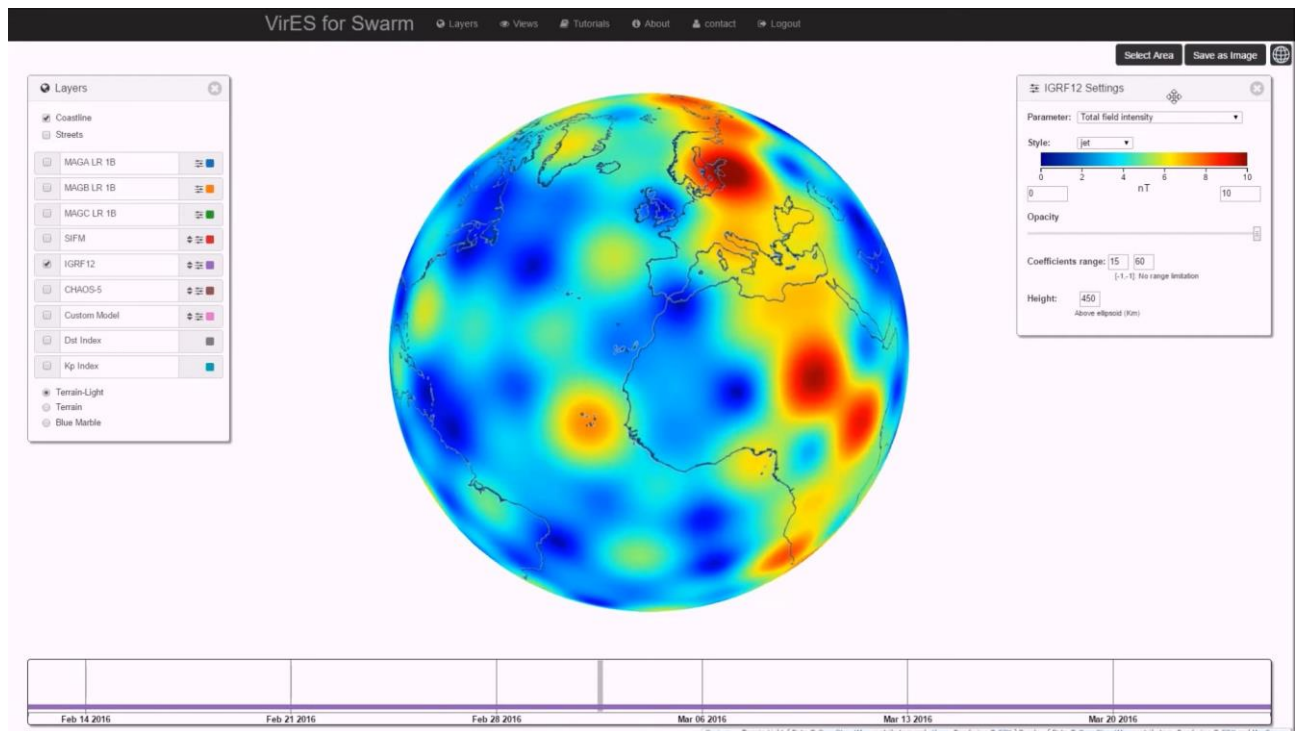


Akselerometro duomenys šiuo metu nėra platinami paprastiems vartotojams, nes juos labai trikdo įvairūs trikdžiai. Pagrindinės problemos yra 1) didelis triukšmo, spyglių ir impulsų skaičius neapdorotuose matavimuose; ir 2) nuo temperatūros priklausomi prietaiso poslinkio svyravimai. Po (pusiau) rankinio šių trikdžių koregavimo, Swarm Charlie akselerometro duomenys pateikiami kaip 2 lygio duomenų produktas ACCCCAL.

Turbūt viename iš svarbiausių duomenų yra MAGx LR (kur „x“ yra „A“, „B“ arba „C“, žeminčio palydovą, rezervuota vieta), yra 1 Hz laiko eilutė su magnetinio lauko stebėjimais iš kiekvieno iš trijų palydovų. Be laiko ir padėties, jame yra magnetinio skaliarinio intensyvumo  $F$  ir trys magnetinio vektoriaus  $B_{NEC} =$  komponentai ( $B_N$ ,  $B_E$ ,  $B_C$ ) Šiaurės rytų centro vietiniame Dekarto koordinatų rėmelyje (kur  $B_N$  yra komponentas link geografinio). Šiaurė,  $B_E$  yra komponentas link geografinių Rytų, o  $B_C$  yra komponentas link Žemės centro). Magnetiniai duomenys esant 50 Hz atrankos dažniui pateikiami duomenų rinkinyje MAGx HR. Tačiau kiek tikslūs yra Swarm palydovų atlikti magnetinio lauko matavimai? Taikant geomagnetinio lauko modeliavimą, nustatyta  $< 1$  nT vektoriaus komponento tikslumo paklaida. Duomenų neatitikimo lygis rodo ne tik gauto modelio, bet ir jo įvesties duomenų tikslumą. Spiečio pradinio lauko modelis buvo nustatytas pirmaisiais spiečiaus duomenų metais ir atitinka vertikalaus magnetinio lauko stebėjimus, kai šaknies vidurkio kvadratas (RMS) neatitinka mažesnio nei 2 nT. Didžiausia šio neatitikimo dalis tikriausiai atsiranda dėl nemodifikuotų signalų, todėl gauta RMS vertė turėtų būti laikoma viršutine duomenų tikslumo riba.

Verta paminėti, jog 2018 m. rugsėjo mėn. duomenimis buvo paskelbta daugiau nei 200 recenzuojamų straipsnių apie mokslinius tyrimus su Swarm duomenimis nuo misijos paleidimo datės. Šie darbai apima Žemės vidaus (šerdies, litosferos ir mantijos) ir jos aplinkos: jonosferos ir magnetosferos srovių sistemų tyrimus, plazmos procesai artimoje žemei aplinkoje ir darbai apie kosminį orą [3].

Taip pat nors misija yra sėkmingai vykdoma, nuo 2014 m. lapkričio 4 d. nebėra ASM skaliarinių duomenų apie Swarm Charlie dėl mirtino instrumento gedimo (pagrindinio ASM prietaiso paleidimo metu ir atsarginio instrumento maždaug po metų). ASM gedimas orbitoje buvo neabejotinai susijęs su didelės energijos spinduliuotės poveikiu. Tačiau yra problemos apėjimas, kad įprastas „Swarm Charlie“ magnetometro paketo kalibravimas dabar atliekamas naudojant ASM duomenis, paimtus iš netoliese skraidančio „Alpha“ palydovo.



8 pav. Swarm misijos duomenų vizualizacijos

### **Išvados**

1. Darbe išanalizuota, magnetinio lauko tyrinėjimo svarba ir ankstesni darbai bei bandymai naudojant „MagSat“ palydovą.
2. Detaliai išanalizuoti ASM ir VFM veikimo principai siekiant tiksliai išmatuoti magnetinį lauką bei visa Swarm palydovo architektūra.
3. Pateikti palydovais gautų duomenų esmė ir realūs jų panaudojimas.

### Literatūros sąrašas

1. MagSat palydovas. Prieiga per: <https://www.eoportal.org/other-space-activities/magsat#spacecraft>
2. ESA „Swarm“ misijos apžalga. Prieiga per: [http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/swarm\\_overview.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/swarm_overview.html)
3. Exploring Geospace from Space: the Swarm Satellite Constellation Mission, Space Research Today, Volume 203, 2018, Pages 61-71, ISSN 1752-9298. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.srt.2018.11.017>.