

## GOCE PROGRAM AND THE PROSPECTS OF SATELLITE GRADIOMETRY

**Abstract:** The subject of the study is to discuss the problem with the use of new differential satellite methods for dynamic space geodesy in order to accurate precision in calculating the desired parameters of the geopotential model, as well as its high spatial and temporal resolution.

---

### Author information:

**Krasimira Kirilova**

Chief assist. PhD

Faculty of Technical Sciences

at Konstantin Preslavsky – University of Shumen

✉ [k.kirilova@shu.bg](mailto:k.kirilova@shu.bg)

🌐 Bulgaria

### Keywords:

GOCE, satellite gradiometry, gradiometer

## Въведение:

В края на 80-те години на миналия век са проведени мащабни разработки за въвеждане на градиометрични измервания с помощта на изкуствени спътници на Земята (ИСЗ). Предварителните проучвания показват значително предимство на спътниковата градиометрия в сравнение с наземната (елиминиране на влиянието на шума, генериран от масите на близки и далечни зони) и самолетната (затруднения при елиминиране на шума от инерциалните ускорения).

Градиометър, монтиран на борда на спътник с голям наклон на орбитата, позволява чрез измерване на вторите производни на потенциала на земното привличане да се изследва гравитационното поле на Земята в широк диапазон от дължини на вълната, ограничено от приемливо съотношение на полезния сигнал към шума.

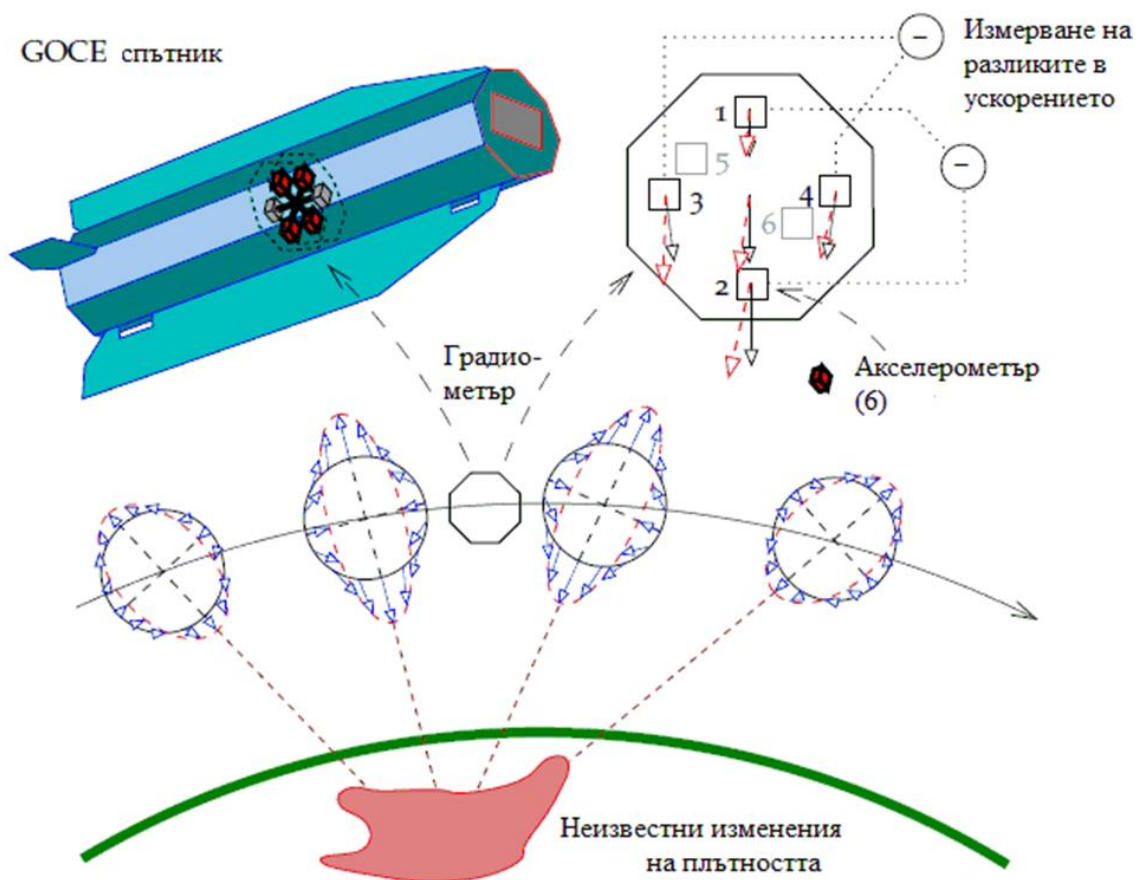
Първата успешна мисия, която използва понятието градиометрия „gradiometry”, наречена Gravity Field and Ocean Circulation Explorer (GOCE), стартира през 2009 г. от Европейската космическа агенция (ESA). Мисията на космически гравитационен градиометър GOCE е резултат от дългогодишни изследвания и разработки, проведени в ONERA, Френската национална служба за аерокосмически изследвания (Touboul 2003, Touboul et al 2004).

Основната цел на проекта е да се изгради модел с висока точност на гравитационното поле на Земята и фигурата на геоида с висока разделителна способност. В резултат на изпълнението на програмата се предполага да се определи превишението на геоида за модела с подробности за резолюцията на фигурата му (половин дължина на вълната) от 100 km с грешка, която не превишава 1-2 cm. Такъв модел ще послужи за изясняване на възгледите на изследователите за вътрешната структура на Земята и динамичните процеси, протичащи в нейната кора и външна мантия, по-специално за движението на литосферните плочи. В комбинация с наличните данни за спътникова алтиметрия, високоточния геопотенциален модел

ще разшири разбирането за процесите на глобална циркулация на водите на Световния океан и свързаните с тях климатични промени.

### Мисия GOCE

Изкуствения спътник на Земята GOCE с маса от около 1000 kg е изведен в орбита през март 2009. Орбитата му е синхронизирана с движението на слънцето и е с наклон  $96.7^\circ$ , а височината ѝ е около 270 km. Синхронизацията със слънцето има две цели – да повиши точността на градиометричните измервания и да осигури енергия за спътника, защото частта му, огрявана от слънчева светлина, е покрита със соларни панели. Орбитата на сателита е на максимално ниска височина от Земята, което позволява най-качествени данни за гравитацията.



Фиг. 1. Определяне на глобалното Земно гравитационно поле с гравитационния градиометър на спътника GOCE [5]

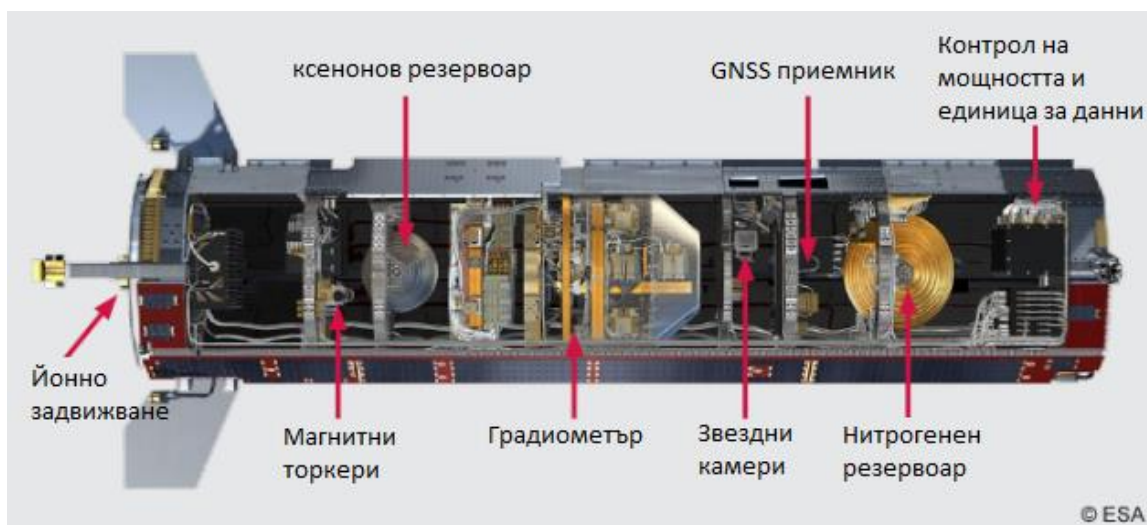
На борда на спътника има три основни системни компонента, използващи върхови технологии, за да осигурят постигането на желаните резултати със съответната точност.

- *Триосен гравитационен градиометър*, представляващ устройство, съставено от три двойки измерители на ускорение, разположени на разстояние 50 cm един от друг в три перпендикулярни оси. Всеки измерител измерва ускорението, породено както от гравитационните, така и от негравитационните сили. При формирането на сумата и разликата

на измерените ускорения между всеки два измерителя, разположени на една ос, се изчислява гравитационното ускорение и по точно вторите производни на потенциала на привличане.

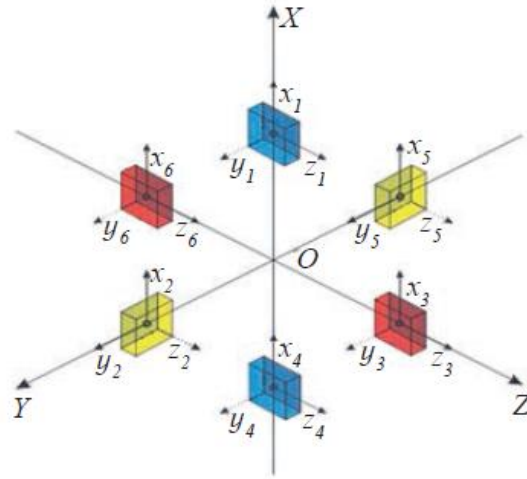
- *Двучестотен GPS приемник*, следящ до 12 GPS спътника едновременно, оптимизиран за работа в ниска орбита. GPS приемника осигурява информация в реално време за положението на спътника в пространството и за скоростта му. Тя се използва както за анализиране и коригиране на орбитата, така и за извличане на гравитационни данни

- *Система за контрол на височината на спътника*, съставена от системата за движение на спътника „без съпротивление“, система за следене на звездите, триосен магнитометър и други сензори. От особено значение за точното определяне на гравитационното поле е системата „без съпротивление“ – специална система, осигурява постоянното „свободно падане“ на спътника около Земята, т.е. компенсираща негравитационните ускорения, действащи на спътника (основно въздушното съпротивление) и елиминирането им. Това се постига чрез измерване на негравитационните ускорения и компенсирането им посредством подаване на съответстваща тяга на йонната система.



Фиг. 2 GOCE спътник и инструменти [6]

В координатната система на градиометъра (фиг. 3) се измерват вторите производни на полето на силата на тежестта. Координатната система на градиометъра се състои от три ортогонални градиометра, техните оси определят координатната система на инструмента XYZ, чието начало  $O$  съвпада с масата на центъра на спътника. Оста  $X$  е ориентирана в посока на движение на спътника в орбита, оста  $Y$  е ортогонална спрямо орбиталната равнина, а оста  $Z$  е насочена към надира. Ориентацията на координатната система на инструмента се контролира от три звездни камери с точност от порядъка на  $1''$ . Поради конструктивните характеристики чувствителността по една от осите на всеки акселерометър е по-ниска, отколкото по другите две.



Фиг. 3. Разположение на шест акселерометра на градиометричната система GOCE [4]

Всеки градиометър съдържа два силно чувствителни акселерометра, които не са свързани помежду си и са поставени в краищата на основата с дължина 0,5m. Тестовата маса на акселерометъра (320 g) с размер  $4 \times 4 \times 1$  cm е направена от платинна-родиева сплав. Тестовата маса е в състояние на левитация (свободно плаващо) вътре в камерата под въздействието на електростатична обратна сила, нейните измествания по координатните оси се записват [4]. От разликите в показанията на двойка акселерометри с известна база се намират измерените стойности на вторите производни. Те се коригират за смущаващи ускорения поради въртенето на спътника, които се определят с помощта на звездни камери и след това се филтрират. Схема на устройството е показана на фиг. 4.

Първите резултати от програмата са получени от обработка на двумесечни (ноември-декември 2009 г.) измервания в честотния обхват на полезния сигнал  $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-1} \text{ Hz}$  (дължина на вълната, съответно, 1600–80 km). Чувствителността на акселерометъра, в зависимост от честотата, е съответно  $0,14 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$  и  $0,03 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ . Постигнатата точност на измерване на вторите производни беше няколко единици от  $10^{-3} \text{ E(mE)}$  [4].



Фиг. 4. Общ вид на градиометъра GOCE [7]

1 - двойки акселерометри; 2 - основа; 3 - електронна система за управление; 4 - система за терморегулация

Обработката на резултатите от космически експеримент, може да се извърши или в рамките на пространствени (*space-wise*) или като част от временни (*time-wise*) подходи. Пространственият *SW*-подход включва обработката на измервания, предварително зададени на възлите на обикновена пространствена мрежа в координатна система, свързана неподвижно с тялото на въртяща се Земя. Идеологията на временния *TW*-подход се основава на представянето на масив от измервания под формата на дискретни времеви редове, поради което измервателните моменти съответстват на точки в орбиталната координатна система. Ясно е, че аналитичната

форма на уравненията за наблюдение и уравненията за поправки ще се определят чрез избрания метод на обработка. В същото време, независимо от него, може да се запише система от уравнения на поправките във вида [1]:

$$\bar{L} = A\bar{X}, \quad (1)$$

където:

$\bar{L}$  е вектор на свободните членове в уравнения на поправките;

$\bar{X}$  - вектор на неизвестни параметри на геопотенциалния модел.

Оценката на точността се извършва по МНМК:

$$\tilde{\bar{X}} = (A^T P A)^{-1} A^T P \bar{L}, \quad (2)$$

$P$  - матрица на теглото се формира въз основа на грешките в измерванията и връзката помежду им.

Перспективите за развитие на метода на спътникова градиометрия, е неразривно свързан с метода на междуспътниковото проследяване. Всъщност орбиталната конфигурация на два ИСЗ винаги може да се разглежда като гигантски еднокомпонентен градиометър с основа, равна на разстоянието между спътниците, играещи роля на тестови гравиметрични маси. На езика на математиката това обстоятелство може да се запише по следния начин [1]:

$$\bar{e}^T(s) \cdot \mathfrak{J} \cdot \bar{e}(s) = (\Delta \bar{a} \cdot \bar{e}(s)) + \frac{1}{s} \left[ (\Delta \bar{v} \cdot \Delta \bar{v}) - (\dot{s})^2 \right], \quad (3)$$

където:  $s$  - междуспътниково разстояние (обхват);

$\dot{s}$  - скоростта на изменение на междуспътниковия обхват;

$\bar{e}(s)$  - единичния вектор на посоката  $s$ ;

$\Delta \bar{v}$  - векторът на относителната линейна скорост на спътниците;

$\Delta \bar{a}$  - векторът на относителното спътниково ускорение.

Лявата страна на формула (3) е градиента на силата на привличане по линията  $s$ , а тензорът  $\mathfrak{J}$  на вторите производни се отнася до средната точка на тази линия. Израз (3) е валиден за произволно разположение на изкуствени спътници в пространството.

В бъдеще, за да се увеличи пространствената и временната разделителна способност, както и точността на гравитационните модели на полето, е препоръчително да се извършат междуспътникови измервания в система на няколко близки спътника, обикалящи около общ център, който от своя страна ще се върти по кръгова геоцентрична орбита.

В заключение на обсъждането на проблема с използването на нови диференциални спътникови методи за динамична космическа геодезия е необходимо да се подчертае, че само методите за измерване в спътникови системи с променлива геометрия на подреждането на елементите са в състояние да осигурят точна прецизност при изчисляване на желаните параметри на геопотенциалния модел, както и неговата висока пространствена и времева резолюция, която предоставя необходимата информация за наблюдение на геодинамични

процеси. Диференциалните спътникови методи имат универсални свойства, които осигуряват ефективността на тяхното приложение за изследване на Луната и други тела от Слънчевата система.

#### References:

1. **Kashteev, P. 2006:** *Differentsialnyye metody dinamicheskoy kosmicheskoy geodezii (Chastu 2 Metod sputnikovoy gradientometrii)*, Kazany, str. 39-40.
2. **Touboul, P. 2003:** *Microscope instrument development, lessons for GOCE Space Sci. Rev.* 108 393–408.
3. **Touboul, P., Foulon B., Rodrigues M. and Marque J. P. 2004:** *In orbit nano-g measurements, lessons for future space missions Aerosp. Sci. Technol.* 8 431–441.
4. **Yuzefovich, A. P. 2014:** *Pole sily tyazhesti i ego izuchenie: uchebnoe posobie*, Moskva, стр. 130, ISBN 978-5-91188-051-4.
5. **Vermeer, M. 2016:** *Physical Geodesy*, Aalto University p. 252, ISBN 978-952-60-8940-9.
6. **URL:**<https://www.semanticscholar.org/paper/ESA%27s-Gravity-Field-and-Steady-State-Ocean-Explorer-Rummel-Gruber/fbeedf7725ca29c10e8856fa23a901162f8f705b/figure/4> (24.06.2020)
7. **URL:**[https://www.dlr.de/rd/DesktopDefault.aspx/tabid-5163/8674\\_read-16441/8674\\_page-4/gallery-1/gallery\\_read-Image.1.8461/](https://www.dlr.de/rd/DesktopDefault.aspx/tabid-5163/8674_read-16441/8674_page-4/gallery-1/gallery_read-Image.1.8461/) (1.07.2020)