

## Точност на моделните пресмятания за целите на спътниковите магнитометрични измервания

*Димитър Данов, Александър Бочев*

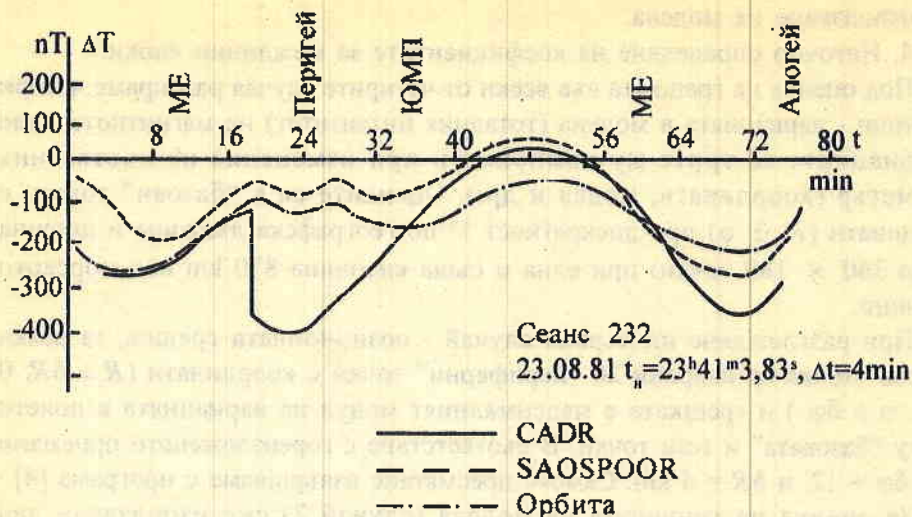
*Лаборатория по слънчево-земни въздействия, БАН*

Първостепенна задача при спътниковите магнитометрични изследвания е сравнението на данните с модел на магнитното поле. Точното познаване на моделното магнитно поле е необходимо както за самия научен анализ на данните, така и при решаване на редица спомагателни задачи. Често получаваните разлики са неприемливо големи, което води до определени затруднения при интерпретацията на измерванията.

От 1981 г. в България се извършват прецизни спътникови магнитометрични измервания с помощта на български магнитометри от серията ИМАП, които летят на изкуствените спътници на Земята (ИСЗ) "Интеркосмос - България 1300", АПЭКС и КОРОНАС.

Още при разглеждане на данните от ИМАП-1 се установи прекъсване в представяне на разликите измерено и моделно поле с амплитуда около 300nT по модул (фиг.1 [1]). Оказа се, че това се дължи на използваната програма CADR [2] за определяне на координатите, която допуска скокообразно изменение от порядъка на 1° (125km) по географска дължина при преминаване през нулевия час (смяна на денонощието).

Освен на програмни грешки, подобни на разгледаната по-горе, неопределеността в координатите на ИСЗ се дължи и на неточността в задаване на началните условия при интегриране уравнението на движение. За всеки обект тя може да бъде различна. За ИСЗ "Интеркосмос - България 1300" тя е по-малка от 12' по ъгъл и 4 km по разстояние [3].



Фиг. 1. Разлики измерено - моделно поле за тоталния интензитет при използване на различни програми за геодезично привързване на ИСЗ "Интеркосмос - България 1300", орбита 231. Прекъсването на двадесетата минута се дължи на грешка в програмата CADR- скок в географската дължина от  $1^\circ$  (125km)

Друг източник на грешка може да е самият магнитен модел или/и неговата програмна реализация.

Математичният модел на земното магнитно поле е разложение по сферични хармоники. Коефициентите в това разложение се определят и утвърждават през пет години. За година, в която те не са определени, коефициентите се интерполират или уточняват чрез модел на векови вариации. Съставени и утвърдени са програми, които пресмятат земното магнитно поле, в съгласие с изложеното. Смята се, че световните модели са близки по точност и описват добре разпределението на главното поле. Все още се спори обаче кой е най-добрият модел за съответната епоха, колко хармонични са достатъчни при описанието на земното магнитно поле при значително отдалечаване от земната повърхност, каква е представителността на модела за вековите вариации и др.

В сегашната работа се поставя задачата да се изследват вариациите (допусканата грешка) в следните случаи, влияещи върху точността на моделното представяне на полето:

1. Грешка в определяне положението на ИСЗ - позиционна грешка.
2. Различия в стойностите на коефициентите на модела на земното магнитно поле.
3. Неправилен избор на броя хармонични в програмите или грешка



при използване на модела.

#### 4. Неточно определяне на коефициентите за междинни епохи.

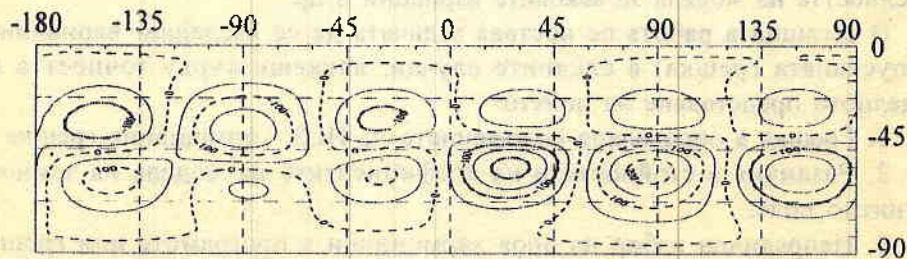
Под оценка на грешката във всеки от четирите случая разбираме четири величини - вариацията в модула (тоталния интензитет) на магнитното поле и вариациите за трите му компоненти при изменение на съответния параметър (координати, модел и др.). Оценките са в "базови" точки, с координати  $(R, \theta, \varphi)$  при дискретност  $1^\circ$  по географска дължина и ширина (общо  $360 \times 180$  точки) при една и съща височина  $870 \text{ km}$  над морското равнище.

При разглеждане на първия случай - позиционната грешка, за всяка "базова" точка са избрани 26 "периферни" точки с координати  $(R \pm \delta R, \theta \pm \delta \theta, \varphi \pm \delta \varphi)$  и грешката е максималният модул на вариацията в полето между "базовата" и тези точки. В съответствие с гореизложеното приемаме  $\delta \theta = \delta \varphi = 12$  и  $\delta R = 4 \text{ km}$ . Самото пресмятане извършваме с програма [4].

За оценка на точността на модела (случай 2) сме използвали два варианта на моделиращи програми [4,5], които се различават само по коефициентите: в [5] те са взети от [6], а в [4] от [7]. Тези програми са широко използвани от изследователи в Русия, САЩ и другаде.

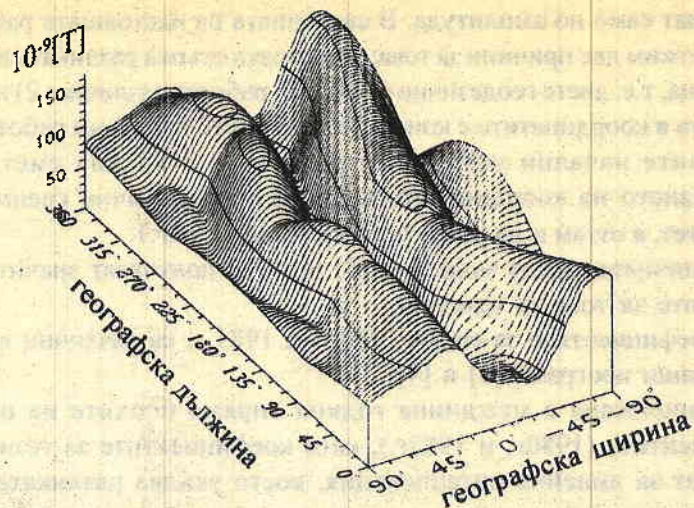
За да изследваме влиянието на избрания брой сферични хармоники, сме използвали програмата от [4]. Получаваме амплитудата за всяка хармонична във всички "базови" точки, след което сумираме определения брой членове (от  $1^{\text{ва}}$  до  $10^{\text{ва}}$  порядък). Подобно на други изследователи, при проучването ни ще допуснем, че изменението на сферични хармонични коефициенти (СХК) е много малко в рамките на една година, около епохите на определянето им. Тази хипотеза изследваме отделно (вж. по-горе случай 4), като използваме програма [4].

Резултатите са представени графично. Същите са илюстрирани с фиг. 2 и фиг. 3. Такива графики има за всеки от анализирания случаи, но тяхното количество е такова, че не бихме могли да ги представим всичките. Качествено те си приличат, а количествените изводи са представени в таблица 1, където е показан диапазонът на изменение в разпределението на резултатите по географски координати.



Фиг. 2. Разлики в тоталния интензитет [nT], пресметнат по модели [4] и [5], на височина  $870 \text{ km}$  за епоха 1982





Фиг. 3. Пространствено изображение на "позиционната" грешка - разликите в тоталния интензитет [nT], пресметнат по модел [4] за височина 870 km, при вариране на координатите на пресмятане

Тук ще разгледаме предимно резултатите за тоталния интензитет. От таблица 1 се вижда, че най-големи разлики се получават в зависимост от използвания модел, около 200nT. Позиционната грешка води до по-малки разлики, около 150nT. При използване на 8 вместо на 10 хармоники разликите са още по-малки, около 70nT.

Подробно представяне на разликите в пресметнатия, по модели [5] и [4], тотален интензитет за епоха 1982 г. и височина 870 km е направено на фиг. 2. На ниски ширини (около 20°), разположени почти симетрично, се очертават по шест екстремума във всяко полукълбо.

От обемното представяне (фиг.3) на позиционната грешка в тоталния интензитет се вижда, че тя е най-голяма на средни ширини. За разлика от фиг. 2 тук няма очертани локални максимуми, а два "хребета", отново почти симетрични, с оси приблизително на 45°.

В [1] се твърди, че методите за определяне на координатите на спътника допускат грешка, която е най-голяма за географската ширина, като достига до 1°. Посочено е, че предизвиканата от това грешка в пресмятането на тоталния интензитет е най-голяма на средни ширини. Това съответства на сегашните резултати (фиг.3).

Фигура 1 демонстрира доколко използването на различни програми за геодезично привързване влияе върху получаваните резултати. Освен прекъсването, получено от използването на програма CADR (една много стара версия), ние виждаме и подобие в хода на отделните криви, които се

различават само по амплитуда. В светлината на настоящата работа можем да предположим две причини за това: 1) на всяка стъпка разликата в координатите е различна, т.е. двете геодезични програми работят различно; 2) на всяка стъпка разликата в координатите е константа, т.е. двете програми работят еднакво, но заложените начални условия са различни. В крайна сметка неточното пресмятането на координатите води до систематична грешка в тоталния интензитет, а оттам и до различие в кривите на фиг. 1.

Различията между моделите [5] и [4] се получават значителни - фиг. 3. Причините за това са няколко:

- коефициентите за епохи 1980 г. и 1985 г. са различни в използваните моделиращи програми [5] и [4];

- използвана е междинна година спрямо епохите на определяне на коефициентите (1980г. и 1985г.), като коефициентите за тези две епохи се използват за линейна интерполация, което усилва разликата.

Получените резултати приемаме като сумарна грешка от измененията в модела и от неточностите при представяне на вековите вариации. Можем да предположим, че моделът [5] като по-стар внася съществени грешки.

Т а б л и ц а 1. Min/Max разлики за трите компоненти и тоталния интензитет (модула) на магнитното поле за разглежданите случаи

СЛУЧАЙ	Грешка модул [nT]	Грешка Br [nT]	Грешка Bt [nT]	Грешка Bz [nT]
1. Неточно положение $\delta R=4\text{km}$ , $\delta \theta = \delta \varphi = 2'$	+33/+173	55/-244	14/-135	2/-69
2. Модел [3] вместо модел [4]	220/+220	-300/+400	-110/+110	-300/+300
3. Осем вместо десет хармонични	-58/+72	-72/+76	-55/+57	-43/+46
4. Сумарна грешка едновременно 1 и 3	35 / 220	60 / 283	18 / 164	3 / 93
5. От интерполация 1981 г. до 1983 г.	149/+23	-140 / 232	-75 / 122	-91/+92

Смятаме за възможно една грешка при определяне положението на ИСЗ да се компенсира от грешката при използване на модела. Затова за



всички "базови" точки сме сумирали (със съответния знак) грешката, получена от неправилния брой хармоники и "позиционната" грешка (ред 4 в табл.1). Вижда се, че сумарната грешка става съизмерима с тази при избор на модел (ред 2 табл.1). Нещо по-интересно - съществува възможност при недобър модел да изберем съответен брой хармонични и ако имаме грешка в определяне положението на ИСЗ, да получим по-добри резултати, отколкото с по-добър модел при фиксиран брой хармонични. За нас важен резултат е, че наблюдаваната в глобалното разпределение на грешката цикличност по географските координати при всеки от разглежданите случаи е нискочестотна. На екваториални ширини грешката е най-малка. Полюсно настъпват първо максимумите на грешката от модела, а след това тези на позиционната грешка. Ясно се вижда, че забележимо изменение в разпределенията има през около  $10^\circ$ . Характерният мащаб, т. нар. "дребномащабни" явления, е под  $2^\circ$ . По тази причина считаме, че изследваните в тази работа източници на неточности в представянето на моделното магнитно поле са несъществени при анализа на "дребномащабните" явления. При движението на ИСЗ около Земята изследваната от нас грешка се включва в разликата на измереното поле и моделното поле. Лесно можем да пресметнем, че ако ИСЗ прави един оборот около Земята за повече от 70 min "включената" грешка се проявява като нискочестотна ( $f < 0,05$  Hz), съставляваща (фиг.1).

Много изследователи приемат, че за една година изменението в коефициентите на модела е незначително. Вследствие на това в рамките на една година те работят с едни и същи коефициенти. Това не е в съгласие с друго предположение, правено от същите изследователи, когато допускат, че коефициентите се изменят линейно за интервал от пет години. Последното е използвано и в моделиращите програми [4,5]. Ние сравнихме пресметнатото магнитно поле [4] за междинните епохи 1981 г. и 1983 г. Резултатите са представени на ред 5 в табл. 1. Установени са разлики от порядъка на 70nT. Разпределението им е също така циклично, но с по-добре изразени екстремуми около магнитните полюси. Годемината на тези разлики ни дава основание да смятаме, че линейна интерполация трябва да бъде прилагана и в рамките на годината. По този начин коефициентите на модела за декември ще бъдат по-близки до коефициентите за следващата година, отколкото до тези за текущата (както е прието сега).

Очакваме получените резултати да помогнат и при изследване на йоносферните токови системи.

## Л и т е р а т у р а

1. Чапанов, Я., Н. Георгиев, А.Л.Бочев, И. Аршинков. Влияние навигационной привязки при сравнении данных ИМАП и модели магнитного поля. - Сб. Научно-экспериментальная программа оптических наблюдений спутника "Интеркосмос -



- Болгария 1300". М., Астр. совет АН СССР, 1982.
2. Пономарев, Ю. Н., Ю. И. Галперин. Программа "CADR" для расчета географических, геофизических и астрономических координат и других характеристик точек вдоль траектории спутника. М., ИКИ-АН СССР. Препр. 70/191.
  3. Назиров, Р. Р., А. А. Тихонов, П. Е. Эльясберг. Навигационная привязка космической информации в эксперименте "Интеркосмос - Болгария 1300". М., ИКИ-АН СССР. Препр. 959/1984, Москва.
  4. Papitashvili, V. P., N. Tsiganenko, M. Peredo. A set of fortran subroutines for computations of the geomagnetic field in the earth's magnetosphere. SPRL, University of Michigan, 1995.
  5. Циганенко, Н. А., А. Я. Усманов, В. П. Папиташвили. Пакет программ для расчета геомагнитного поля. М., Геофиз. Комитет, 1987.
  6. Геомагнетизм и Астрономия. V. 26, 523-525, 1986.
  7. EOS TRANS. AGU APRIL 21, 1992, P. 182.
  8. Peddie, N. W. International Geomagnetic Reference Field.

Поступила на 20. III. 1996

## On the accuracy of the model of the main field in satellite magnetometer measurements

*Dimitar Danov, Aleksander Bochev*

(Summary)

The comparison with the main field model, plays a major role in the satellite magnetometer data analyses. It is accepted that the accuracy of the main magnetic field model is determined by the positional error as well as by the accuracy of the model itself (including the secular variation representation).

In this work the positional error is simulated by varying the coordinates of the observed point. For the examination of the accuracy of the model itself, two models [3,4] have been compared (for epoch 1982).

It is shown that the the main field model is free from significant errors in the equator zone. Poleward from the equator the largest model field error appears (LAT = 25°), then the positional error effect comes to its maximum (LAT = 45°). These types of error exhibit a very low frequency fluctuation ( $f = 0,05$  Hz).