

УДК 629.783:527.6

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ГРАВИТАЦИОННОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЦЕЛЮ МОНИТОРИНГА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Матвиенко С.А.

В статье описан анализ возможности измерения параметров гравитационного поля Земли с использованием эффекта гравитационного смещения частоты электромагнитного излучения.

Ключевые слова: гравитация, частота.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются и широко используются во всех сферах жизнедеятельности человечества глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). В дополнение к уже существующим ГНСС ГЛОНАСС и GPS создаётся европейская ГНСС Galileo, в создании и эксплуатации которой предполагает активно участвовать и Украина, что и нашло своё отражение в III национальной космической программе Украины [1].

Одним из наиболее интересных направлений развития ГНСС является изучение радиофизических эффектов, которые сопровождают распространение электромагнитных сигналов ГНСС. Учёт этих эффектов при измерениях позволит не только улучшить точность местоопределения, но и получить дополнительную геофизическую информацию [2÷23].

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В соответствии с [11,12] основными радиофизическими эффектами являются:

- изменение времени распространения сигнала в тропосфере и ионосфере;
- изменение амплитуды сигнала вследствие эффектов поглощения и рассеяния на тропосферных и ионосферных неоднородностях;
- изменение поляризации сигнала при его ионосферном распространении;
- доплеровский сдвиг частоты;
- гравитационный сдвиг частоты;
- эффекты многолучёвости.

Наиболее весомыми в части влияния на амплитуду и фазу сигнала являются тропосферные и ионосферные эффекты, а в части влияния на частоту – доплеровский и гравитационный сдвиг частоты сигнала ГНСС. Суммарный сдвиг частоты может быть определён с помощью следующего соотношения:

$$\Delta f_{\Sigma} = \Delta f_{д} + \Delta f_{г}$$

где Δf_{Σ} – суммарный сдвиг частоты

Δf_d – доплеровский сдвиг частоты

Δf_g – гравитационный сдвиг частоты.

Если ионосферные, тропосферные влияния, а также доплеровский сдвиг частоты достаточно хорошо изучены и учитываются в настоящее время при эксплуатации ГНСС [11÷13], то гравитационное смещение частоты сигнала усреднённо компенсируется путём ввода систематического сдвига в фундаментальную частоту спутниковых часов [24], а именно, вместо частоты 10,23 МГц используется частота 10,22999999545 МГц, что позволяет принимать на Земле номинальную частоту.

Необходимо отметить, что разработка достаточно точных методов решения обратной задачи, то есть определения значения силы тяжести в некоторой точке по гравитационному сдвигу частоты сигнала ГНСС, позволит решить, с помощью ГНСС, две основные задачи геодезии [25]:

- определение размера и формы Земли;
- определение значения силы тяжести на геоиде.

Известно [2], что гравитационное смещение частоты сигнала определяется следующим соотношением:

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{u_0 - u_1}{c^2} \quad (1)$$

где f – частота

u – гравитационный потенциал

c – скорость света.

Согласно [26]:

$$u = \frac{a_{00}}{R}$$

где

$$a_{00} = \gamma M = 3,98 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$$

Таким образом, соотношение (1) примет вид и для GPS будет иметь следующее значение:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta u}{c^2} = \frac{\frac{a_{00}}{R_3 + L} - \frac{a_{00}}{R_3}}{c^2} = \frac{\gamma M}{c^2} \left(\frac{1}{R_3 + L} - \frac{1}{R_3} \right) = 4,46 \cdot 10^{-10} \quad (2)$$

Это значение намного превышает погрешность 10^{-13} бортового стандарта частоты уже существующих ГНСС, что показывает принципиальную техническую возможность реализации радиофизического метода измерения значения ускорения силы тяжести.

Однако необходимо отметить, что соотношение (2) непригодно для практического использования в части определения значения силы тяжести по гравитационному смещению частоты, поскольку оно не учитывает пространственного профиля гравитационного потенциала (ускорения силы тяжести). В этом плане более приемлемым может быть следующее соотношение [27]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{g\Delta R}{c^2} \quad (3)$$

где $\Delta u = g\Delta R$, при измерениях в одной точке.

Приравнявая значения u из соотношения (2) и (3), получаем:

$$gR = \frac{\gamma M}{R},$$

$$g = \frac{\gamma M}{R^2},$$

$$F = mg = \frac{\gamma mM}{R^2}$$

Очевидно, что в соотношении (2) для определения значения гравитационного потенциала использовали уравнение закона всемирного тяготения Ньютона, что, безусловно, очень удобно, однако неверно для случая измерения относительно КА, который вращается по круговой орбите на высоте 20000 км. В этом случае более предпочтительным является использование третьего закона Ньютона применительно к движению тел в земном поле тяготения [28]

$$\frac{mV^2}{R_0} = mg$$

$$u = V^2 = gR \quad (4)$$

подставляя соотношение (4) в (3) получаем:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{u_0 - V_0^2}{c^2} \quad (5)$$

$$u_0 = V_0^2 + \frac{\Delta f}{f_0} c^2 \quad (6)$$

$$g = \frac{V_0^2 + \frac{\Delta f}{f_0} c^2}{H_0} \quad (7)$$

где V_0 – орбитальная скорость КА ГНСС

$\frac{\Delta f}{f_0}$

– гравитационное смещение частоты ГНСС

H_0 – высота точки измерений.

Однако необходимо также учитывать, что при движении фотона поперёк линий напряжённости гравитационного поля, релятивистская масса фотона характеризуется вдвое большей величиной $2h\nu/c^2$, по сравнению с массой фотона $h\nu/c^2$ при движении вдоль линий напряжённости [29], что определяет необходимость проведения эксперимента при условии нахождения КА ГНСС в надире под точкой измерения.

Определяя в точке измерений координаты и гравитационное смещение частоты и зная параметры орбиты и скорости КА ГНСС мы можем определить значение ускорения силы тяжести в любой точке измерений. Такой метод определения значения ускорения силы тяжести будет реализован в рамках проекта НТЦУ № 3856 [30].

Очевидно, что соотношение (5) в случае измерения значения ускорения силы тяжести на борту КА [8] будет иметь вид:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{V_0^2 - V_1^2}{c^2} \quad (8)$$

В случае проведения измерения на поверхности Земли соотношение (5) примет вид

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{g\Delta H}{c^2}$$

Эта формула соответствует соотношению, полученному в ходе эксперимента Паунда-Ребки в 1926 году, за который была присуждена Нобелевская премия [26].

ГРАВИТАЦИОННОЕ СМЕЩЕНИЕ И ЭФФЕКТ ХАББЛА

Особенно удобно использовать соотношение (8) для определения гравитационного смещения частоты в пределах космических систем, в частности солнечной. Результаты таких вычислений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Относительное гравитационное смещение излучения планет Солнечной системы относительно Земли

Параметры Планеты	R, 10 ⁶ км	V _{орб} , км/с	$\frac{\Delta f}{f_0}$, 10 ⁻¹⁰
Меркурий	58	48,8	-165,9
Венера	108	35,0	-37,4
Земля	149	29,8	
Марс	227,9	24,2	33,6
Юпитер	778,4	13,06	79,8
Сатурн	1429,4	9,46	88,72
Уран	287	6,81	93,51
Нептун	4498	5,432	95,39
Плутон	5906,4	4,666	96,25

Отсюда возникает законный вопрос:

– Как отличить в этом случае гравитационное смещение от хаббловского?

При этом нужно учитывать, что Хаббл открыл эффект красного смещения в 1924 году, а Паунд открыл гравитационное смещение в 1960 году и они оба получили Нобелевские премии.

Очевидно, что Хаббл никак не мог учитывать гравитационное смещение частоты, и, следовательно, в хаббловском смещении, как минимум, присутствует часть гравитационного смещения [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическое использование эффекта гравитационного смещения частоты с целью мониторинга гравитационного поля Земли позволяет обеспечить прогноз сейсмической активности, геологическую разведку, изменение эпидемиологической обстановки и др. [31, 32].

Список литературы

1. Загальнордержавна (національна) космічна програма України. Короткий звіт.
2. Ashby N., Relativity in the Global Positioning System // Living Rev. Relativity. – 2003. – № 6. – 45 p. <http://www.livingreviews.org/Articles/Volume6/2003-Iashby/>.
3. Calónico D., Cina A., Bendea I. H., Levi F., Lorini L. and Godone A., Gravitational redshift at INRIM. Metrologia. – 44 (2007). – L44–L48.
4. Матвиенко С.А. и др., Дистанционное зондирование Земли по геофизическим параметрам с использованием КС «Сич-1М». Сборник докладов Второй всероссийской научной конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами», том 2. – Санкт-Петербург, 2004. – С. 20-24.
5. Матвиенко С.А. и др., Измерение гравитационного поля Земли с помощью геофизического микроспутника. Современные проблемы ДЗЗ из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Том 1. – 2005. – С. 196-199.
6. Матвиенко С.А. и др., Космические исследования территории Украины на основе геофизических параметров и использования космических систем «Сич-1М» и «Микроспутник». Космическая наука и технология. – №6/6. – 2003. – С. 174-179.
7. Matvienko S.A. and others, Geophysical Parameters-based Space Systems of Earth Remote Diagnosis. Proceeding of the Second IEEE International Workshop IDAACS-2003. – P. 418.
8. Макаров О.Л., Матвиенко С.А., Мелешко О.В., Андросов М.А., Спосіб визначення параметрів гравітаційного поля. Заявка на винахід. – Реєстр. № а2006 01752 від 20.02.2006, Україна, МПК 7: G01V 7/16. Заявник: ДКБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, Дніпропетровськ.
9. Матвиенко С.А. и др., Использование космической навигационной системы для геофизических исследований. Современные проблемы ДЗЗ из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Том 1. – 2005. – С.64-66.
10. Матвиенко С.А. и др., Проектирование системы мониторинга гравитационного поля Земли с использованием EGNOS. Сборник статей ДНУ.
11. Матвиенко С.А., Прокопов А.В., Радиофизические эффекты при распространении сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и их влияние на точность измерений // Український метрологічний журнал. - 2006. - №4. - С. 6-12
12. Матвиенко С.А., Прокопов А.В., Радиофизические эффекты при распространении сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) // Наукові праці V-й Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка", Том 2, Харків: Національний науковий центр "Інститут метрології". – 10-12 жовтня 2006 року. – С. 155-156.
13. Матвиенко С.А. и др., Использование ГНСС для экспериментальной проверки теории относительности и определения ускорения силы тяжести по изменению частоты сигнала в гравитационном поле. Сучасные достижения геодезической науки та виробництва. Вестники НУ «Львівська політехніка». Випуск 1(13). – 2007. – С. 84-87.
14. Матвиенко С.А. и др., Система измерения гравитационного поля Земли на базе навигационных спутниковых систем. Сборник статей ГП «КБ «Южное» (готовится к публикации).
15. Matvienko S.A., Global monitoring of Earth gravitational field utilizing space navigation systems. Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 2005.

16. Matvienko S.A. and others, Relativistic effects in the Global Positioning System. Acta Astronautica (готовится к публикации).
17. Матвиенко С.А. и др., Глобальный мониторинг гравитационного поля Земли с использованием гравитационных спутниковых систем. Сборник докладов 58-го Международного конгресса по астронавтике. – Хайдарабад, Индия, 2007.
18. Agarkov A.V., Grigorash I.V., Matvinenko S.A., Selivanov Yu.A., Measurements of Earth gravitational field using geophysical microsatellite. 2nd Open All-Russia Conference "Current problems of Earth remote sensing from outer space". – 16. November, 2004.
19. Matvienko S.A., Geophysical parameters-based space system of Earth remote diagnosis proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 2005.
20. Agarkov A.V., Grigorash I.V., Matvinenko S.A., Meleshko A.V., Geophysical microsatellite. 4th Ukrainian conference on promising space exploration trends. – 12.09.04.
21. Grigorash I.V. and Matvinenko S.A., Application of geophysical microsatellite for studies into seismic activity. VII International youth scientific and practical conference "Man and outer space". – 13.04.05.
22. Радионавигационная система. автор Матвиенко С.А. – № а 2005 12250 от 19.12.2005.
23. Matvienko S.A. Measurements of Earth Gravitational Field by Satellite Navigation Systems // Thematic International Conference on Bio-, Nano- and Space Technologies, EU & Science Centers Collaboration. – Ljubljana, Slovenia. – March 10-12, 2008.
24. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Г., Коллинз Д., Глобальная система визначення місцеположень (GPS). Теорія і практика. Пер. з англ. за ред. акад. НАНУ Яцківа Я.С. – Київ, Наукова думка, 1996. – 380 с.
25. Тартачинська З.Р., Визначення висот геоїда і аномалій сили ваги за даними супутникової альтиметрії. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. НУ «Львівська політехніка». – Львов, 2001.
26. Эльясберг П.Е., Введение в теорию полёта ИСЗ. – М.: Наука, 1965.
27. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 3 – М.: Наука, 1989. – 527 с.
28. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г., Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1972.
29. Бутиков Е.И. и др., Физика для поступающих в ВУЗы. – М.: Наука, 1991. – С. 529.
30. Проект НТЦУ № 3856. www.stcu.int.
31. Матвиенко С.А., Глобальный мониторинг гравитационного поля с целью выявления воздействия на психофизиологическое состояние человека. Доклад на VII международной крымской конференции «Космос и биосфера». – Судак, 1-6.10.07.
32. Зорькин Л.М., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. и др. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцевых геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле. – Открытие от 24.07.80 № 234.

Матвиенко С.А. Аналіз можливості використання ефекту гравітаційного зсуву частоти електромагнітного випромінювання з метою моніторингу гравітаційного поля Землі // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. – 2008. – Серія «Географія». – Т. 21 (60). – № 1. – С. 81-86

У статті описаний аналіз можливості виміру параметрів гравітаційного поля Землі з використанням ефекту гравітаційного зсуву частоти електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: гравітація, частота.

Matvienko S. Analysis of possibility of use of gravitational shift of electromagnetic radiation frequency effect with the purpose of Earth's gravitational field monitoring // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – Series «Geography». – V. 21 (60). – № 1. – P. 81-86

In this article described analysis of possibility of measurements of Earth's gravitational field parameters with the use of effect of gravitational shift of electromagnetic radiation frequency.

Key words: gravitation, frequency

Поступила в редакцію 24.04.2008 г.