

УДК 389.14 (621.371)

**ОТ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭФФЕКТОВ В ГНСС
ДО РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ГЕОДЕЗИИ**

С. Матвиенко, А. Мелешко

Государственное КБ “Южное”, г. Днепропетровск

А. Прокопов, В. Романько, Г. Сидоренко, В. Копыл

Национальный научный центр “Институт метрологии”, г. Харьков

И. Тревого, К. Третьяк

Национальный университет “Львовская политехника”

Постановка проблемы

Релятивистские эффекты уже давно превратились из экзотики в повседневную реальность не только для фундаментальных научных исследований, но и для целого ряда широко распространенных технических приложений. К таким приложениям относятся, в частности, созданные во второй половине XX века глобальные навигационные спутниковые системы GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), а также находящиеся в стадии разработки аналогичные системы Galileo (Европейский Союз), Compass (Китай), QZSS (Япония). Указанные системы (для которых в последнее время принято использовать общую аббревиатуру ГНСС) могут функционировать лишь при условии введения так называемой релятивистской поправки к частотам эталонных генераторов из состава бортовой аппаратуры ИСЗ, входящих в ГНСС [1, 2].

Положительный опыт учета релятивистских поправок в ГНСС стал мощным стимулом для активизации как фундаментальных, так и прикладных исследований, связанных с применением принципов теории относительности в науке и технике. Большое количество публикаций, посвященных этой тематике, делает актуальным анализ современного состояния и перспектив развития обсуждаемого научного направления. Попытка такого анализа – прежде всего в части основных работ, представляющих интерес для геодезии, навигации и метрологии – предпринята в этой работе.

Анализ последних достижений и публикаций

В соответствии с целью этой статьи рассмотрим публикации, посвященные релятивистским системам отсчета, релятивистской геодезии, применению релятивистских эффектов для мониторинга характеристик среды распространения электромагнитных волн в околоземном пространстве. Особое внимание уделим релятивистскому аспекту пространственно-временных измерений.

В уравнениях, описывающих функционирование существующих ГНСС, релятивистские эффекты учитываются с помощью поправок к соотношениям, полученным в рамках классической ньютоновской теории. В то же время имеется ряд предложений (в частности, проект SYPOR [3, 4]) по теоретическому обоснованию полностью релятивистской ГНСС, идеология которой должна быть построена на принципах теории относительности (необходимость в релятивистских поправках в этом случае отпадает [5]).

Практическая реализация релятивистского подхода требует повышенной точности пространственно-временных измерений, поэтому совершенствованию эталонов времени-частоты, а также методов их сличений, в том числе с учетом релятивистских эффектов, в настоящее время уделяется очень большое внимание. Существует огромное количество публикаций, посвященных

этой проблеме. Достаточно полное представление о состоянии и перспективах развития время-частотных измерений можно получить, ознакомившись с трудами последних международных конференций. Например, с тезисами и презентациями симпозиума [6], где идет речь об атомных и лазерных (на эффекте лазерного охлаждения атомов) эталонах времени-частоты, системах синхронизации и сравнения высокостабильных частот с помощью микроволновых и оптических линий связи, а также о новых проектах, посвященных разработке как наземного, так и бортового время-частотного оборудования. Среди таких проектов следует отметить проект Европейского космического агентства ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) – целью проекта является достижение нестабильности частоты на уровне 10^{-16} в условиях международной космической станции. Проект SAGAS (Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors), представленный Европейским космическим агентством (ЕКА), направлен на расширение фундаментальных исследований в солнечной системе после 2015 года. Этот проект подан на конкурс ЕКА, где сейчас рассматривается уже более 50 предложений [7], в том числе проект EGE (Einstein Gravity Explorer), также посвященный фундаментальным исследованиям на основе высокоточных время-частотных измерений.

Впечатляющие темпы прогресса в области высокостабильных атомных и оптических часов вызвали активную дискуссию относительно того, каким образом этот прогресс скажется на геодезии и геофизике. Результаты этой дискуссии (в частности, представленные на европейских и международных конференциях [8, 9]) пока еще не вышли за рамки общих технических предложений, но предсказывают широкое использование релятивистского подхода при решении геодезических и геофизических задач. В докладе [10], например, прямо говорится, что будущая геодезия должна быть релятивистской.

Изложение основного материала

Оценим возможности релятивистского подхода для развития методов геодезии и геофизики на примере анализа перспектив использования эффекта релятивистского сдвига частоты радиосигнала, распространяющегося в гравитационном поле, для определения характеристик этого поля. Основным исходным соотношением в этом случае является известное уравнение теории относительности, связывающее гравитационный потенциал u_0 в точке, где сигнал имеет частоту f_0 , с гравитационным потенциалом u_1 в точке, где частота сигнала равна f_1 [1, 2]

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

где c – скорость света.

Оценим требования к точности частотных измерений, учитывая информацию, приведенную выше при обзоре литературы и опираясь на результаты работ [11,12].

Из уравнения (1), предположив, что $\frac{m_{f_1}}{f_1} \approx \frac{m_{f_0}}{f_0} \approx \frac{m_f}{f}$; $f_1 \approx f_0$, получаем уравнение погрешности

$$m_{u_1}^2 = m_{u_0}^2 + c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2}, \quad (2)$$

где m_{u_1}, m_{u_0}, m_f – погрешности определения величин u_1, u_0, f , соответственно (далее при оценках будем считать, что $m_{u_1}^2 \approx m_{u_0}^2 \approx m_u^2$).

Прежде чем оценить требования к точности измерений величин f_0, f_1 с помощью (2), необходимо выяснить, а с какой же точностью надо знать u_1, u_0 , то есть необходимо найти априорную (требуемую) погрешность m_u . Для определения этой погрешности сопоставим точностные возможности рассматриваемого метода определения характеристик гравитационного поля по гравитационному сдвигу частоты с возможностями известных методов, применяемых в проектах CHAMP, GRACE, GOCE.

Отметим, что в рамках проекта CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) в 2000 году запущен специальный ИСЗ, оснащенный акселерометрами и GPS приемниками. Накоплен огромный объем информации, которая использована для разработки моделей гравитационного потенциала, описанных в большом количестве публикаций, в том числе – представленных на сайте Центра наук о Земле в Потсдаме (GeoForschungsZentrum Potsdam) [13]. По литературным данным разработанные модели обеспечивают определение ускорения силы тяжести с погрешностью не хуже 5 mGal при пространственном разрешении 400 км. В рамках проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) в 2002 году запущено два идентичных ИСЗ, разнесенных на расстояние 220 км. ИСЗ оснащены сходной аппаратурой, а также СВЧ дальномером (для высокоточного измерения расстояния между спутниками) и отражателями лазерного излучения для контроля положения ИСЗ с помощью дальномеров с Земли. По сравнению с CHAMP разрешающая способность аппаратуры повышена примерно в 2 раза [14]. Запуск ИСЗ в рамках проекта GOCE (Global Ocean Circulation Experiment) планировался на лето 2008 года, но был отложен. Ожидается, что погрешность восстановления ускорения силы тяжести будет уменьшена до 1 mGal при пространственном разрешении 100 км [15].

В качестве характеристик точности методов, использующихся в вышеуказанных проектах, в литературе приводятся, прежде всего, погрешность определения ускорения силы тяжести g в заданной точке и пространственное разрешение метода. Чтобы перейти к этим характеристикам в наших оценках, воспользуемся известной связью $g = \frac{du}{dx}$, отражающей тот физический факт, что ускорение силы тяжести определяется как производная гравитационного потенциала по координате.

При задании потенциала в дискретных точках (разнесенных в соответствии с пространственным разрешением метода), переходя от дифференциалов к конечным приращениям, имеем

$$g = \frac{u_a - u_b}{x_a - x_b} = \frac{u_a - u_b}{\Delta x}, \quad (3)$$

где $\Delta x = x_a - x_b$ – пространственное разрешение.

Из (3) имеем уравнение, связывающее погрешности измеряемых и искомых величин

$$m_g^2 = \frac{m_{ua}^2}{\Delta x^2} + \frac{m_{ub}^2}{\Delta x^2} + \left(\frac{u_a - u_b}{\Delta x} \right)^2 \cdot \left(\frac{m_{\Delta x}}{\Delta x} \right)^2,$$

где $m_{\Delta x}$ – погрешность определения расстояния между точками пространства, в которых определяется гравитационный потенциал.

Отсюда, полагая, что $m_{ua}^2 \approx m_{ub}^2 \approx m_u^2$, имеем

$$\frac{m_g^2}{g^2} = 2 \frac{m_u^2}{(g \cdot \Delta x)^2} + \frac{m_{\Delta x}^2}{(\Delta x)^2}. \quad (4)$$

С помощью уравнений (2), (4) можно определить требования к точности измерений частоты сигнала в рамках предлагаемого метода в условиях, характерных для известных методов CHAMP, GRACE, GOCE. Данные соответствующих расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

m_g , мГал	1		5		10		100		500	
Δx , км	100	400	100	400	100	400	100	400	100	400
m_u	0,7	2,8	3,5	14,0	7,0	28,0	70,0	280,0	350,0	1400,0
$\frac{m_f}{f} \cdot \frac{10^{16}}{1,41}$	0,056	0,22	0,28	1,1	0,56	2,2	5,6	22,0	28,0	110,0

Анализируя данные табл. 1, необходимо принять во внимание следующее: во-первых, в настоящее время уже достигнута относительная погрешность воспроизведения частоты на уровне $3 \cdot 10^{-16}$ (для H-мазера на временном интервале 1 час [16]); во-вторых, согласно [16] достижение погрешности $1 \cdot 10^{-16}$ возможно в ближайшие год-два с помощью существующих подходов (для перехода к погрешности $1 \cdot 10^{-17}$ необходимо предпринять определенные усилия по совершенствованию оптических эталонов [17], а также методов их сличений; что касается достижения более высоких точностей, то здесь необходим глубокий пересмотр существующих теоретических представлений).

Выводы

С учетом вышесказанного можно сделать вывод о том, что метод определения характеристик гравитационного поля по релятивистскому сдвигу частоты может быть реализован уже в ближайшее время на уровне точности, соответствующей проекту CHAMP. Экспериментальную проверку метода проще всего осуществить с использованием международной космической станции (МКС) – принимая во внимание приведенные выше в обзоре литературы предложения о размещении на ее борту высокоточных стандартов частоты [9]. Одной из важных задач по подготовке такого эксперимента следует считать предварительные экспериментальные исследования методов и средств высокоточных время-частотных измерений, а также анализ соответствующих возможностей существующей и перспективной аппаратуры для ГНСС измерений.

Дальнейшие перспективы практического использования релятивистских эффектов в геодезии, геофизике, метрологии связаны, прежде всего, с ожидаемым развитием методов и средств время-частотных измерений. Несмотря на то, что специалисты-метрологи, работающие в области измерений времени-частоты, оценивают темпы указанного развития с меньшим оптимизмом [6, 16], нежели геодезисты [8–10], нет никаких оснований сомневаться в том, что в ближайшее время мы будем иметь дело с релятивистской геодезией, станем свидетелями повышения точности экспериментальной проверки предсказаний теории относительности и уточнения ряда фундаментальных физических констант.

Литература

1. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Р., Коллинз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика. Пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наук. думка. – 1995 – 380 с.
2. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // *Living Rev. Relativity*. – V. 6. – 2003. – pp. 1–45 <http://www.livingreviews.org/Articles/Volume6/2003-1ashby/>.
3. Coll B. Elements for a theory of relativistic coordinate systems. Formal and physical aspects // In: J.-F. Pascual-Sánchez, L. Flor-ya, A. San Miguel, and F. Vicente, editors, *Reference Frames and Gravitomagnetism*, p. 53. World Scientific, Singapore, 2001.
4. Coll B. Physical Relativistic Frames / In: N. Capitaine, editor, *Journées 2001 Systèmes de Référence Spatio-Temporels*. Observatoire Royal de Belgique, 2003.
5. Pascual-Sanchez J.-F. Introducing relativity in global navigation satellite systems // *Annalen der Physik*. – V.16. – Iss.4. – pp. 258–273.
6. Abstracts for 7th Symposium on Frequency Standards and Metrology. Asilomar Conference Center in Pacific Grove, California, USA < October 5-11, 2008 // <http://fsm.jpl.nasa.gov/abstracts.htm>.
7. <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=41177>
8. Presentation on IUGG 2007, XXIV General Assembly, 2-13 July 2007. Perugia, Italy.
9. Presentation on 22 European Time and Frequency Forum. 23–25 April, Toulouse, France.
10. Svehla D. ACES – The First Demonstration of Relativistic Geodesy // Presentation on Seminar Theoretical Aspects of ACES Mission. Galileo Galilei Institute of Theoretical Physics, 29–30 April 2008, Florence, Italy (see site <http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~drazen/>).

11. Прокопов А., Соловьев В., Занимонский Е., Занимонская Е., Матвиенко С., Тревого И. Использование ГНСС для экспериментальной проверки теории относительности и определения ускорения силы тяжести по изменению частоты сигнала в гравитационном поле // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2007 (1 випуск). – С.84–87.
12. Prokopov A., Matvienko S., Meleshko A. a.a. Relativistic effects in global satellite navigation systems // Acta Astronautica, 2009. – V. 64. – No 1. – P. 67–74.
13. Reigber, Ch., Luehr, H. and Schwintzer, P. CHAMP Mission Status // Advances in Space Research, Vol. 30, No. 2. – P. 129–134, 2002 (см. также <http://www.gfz-potsdam.de>)
14. Zhu, S, Reigber, C, Konig, R Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data// JOURNAL OF GEODESY, Sept. 2004, Vol. 78, Issue 1–2. – P. 103–108 (см. также на сайте <http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/citation.html>).
15. Rebhan, H., Aguirre M., Johannessen J., (2000). The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Mission – GOCE// ESA Earth Observation Quarterly 66: 6–11 (см. на сайте http://www.esa.int/esaLP/GTCVCKSC_LPgoce_0.html .pdf, 311 KB).
16. Petit G. From atomic clocks to coordinate times // Presentation for Joint Discussion 16 IAU XXVI-th General Assembly. Prague, 2006. – 13 p.
17. Moudrak A., Klein H., Eissfeller B. Future Time Opportunities for Using Optical Clocks in GNSS Systems // Inside GNSS, September/October 2008, pp. 45-50.

Від релятивістських ефектів у ГНСС до релятивістської геодезії

С. Матвиенко, О. Мелешко, О. Прокопов, В. Романько,
Г. Сидоренко, В. Копил, І. Тревого, К. Третяк

Розглядаються сучасний стан та перспективи розвитку наукових досліджень, пов'язаних з використанням релятивістського підходу до просторово-часових вимірювань.

От релятивистских эффектов в ГНСС до релятивистской геодезии

С. Матвиенко, А. Мелешко, А. Прокопов, В. Романько,
Г. Сидоренко, В. Копыл, И. Тревого, К. Третьяк

Рассмотрено современное состояние и перспективы развития научных исследований, связанных с использованием релятивистского подхода в пространственно-временных измерениях.

From relativistic effects in GNSS to relativistic geodesy

S. Matvienko, A. Meleshko, A. Prokopov, V. Roman`ko,
G. Sidorenko, V. Kopil, I. Trevogo, K. Tret`yak

The state and prospects of researches, connected with usage of relativistic approach for time-space measurements, are discussed.