



УДК 621.371

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

С.А. Матвиенко, кандидат технических наук, начальник отдела ГП “КБ “Южное”, г. Днепропетровск



*Освещены проблемы измерения гравитационного смещения частоты радиосигнала при определении пространственных характеристик гравитационного поля Земли.*

*The problems of measuring gravitational displacement of radio call frequency at determining spatial characteristics of the Earth's gravitational field are outlined.*

### Введение

Масштабные международные проекты, предпринимаемые с целью построения моделей гравитационного поля Земли [1–3], имеют такие существенные недостатки, как техническая сложность и высокая стоимость. Таким образом, актуальной является разработка новых методов исследования (восстановления) гравитационного потенциала Земли. Представляет интерес анализ путей практической реализации предложенного в [4, 5] и развитого в [6–11] радиофизического метода определения характеристик гравитационного поля Земли с использованием эффекта гравитационного смещения частоты, проявляющегося, в частности, при функционировании глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [12–14].

Цель данной работы – показать возможности практической реализации радиофизического метода определения пространственных характеристик гравитационного поля Земли на основе использования некоторых особенностей приемников сигналов ГНСС [15].

### Основная часть

Сдвиг частоты сигнала ГНСС [5, 14] на пути от излучателя до приёмника включает в себя классическое частотное доплеровское смещение, гравитационное смещение частоты, частотное доплеровское смещение второго порядка, частотные смещения, вызванные ионосферными и тропосферными эффектами, а также ошибками атомных часов. Если выделить только гравитационное частотное сме-

щение, то можно определить разность геопотенциалов между двумя точками, в которых установлены ГНСС-приемники [6].

Для исследования возможности практической реализации радиофизического метода определения пространственных характеристик гравитационного поля Земли использовался комплекс аппаратуры, в состав которого входили [17]:

- комплекс технических средств;
- общесистемное программное обеспечение;
- специальное программное обеспечение.

В состав комплекса технических средств входили:

- приемники сигналов ГНСС;
- частотный компаратор;
- государственный первичный эталон единиц

времени и частоты:

- баллистический гравиметр;
- ПЭВМ.

В состав специального программного обеспечения входили:

- программное обеспечение приемника сигналов ГНСС;
- программное обеспечение “Обработка навигационной информации”;
- программное обеспечение “Гравика”.

На рисунке [18] приведена схема приемного комплекса, использовавшегося для определения отклонения частоты опорного генератора GPS-спутника от номинального значения. Основой комплекса является система внешних сравнений эталона ТТС-2. Приемник Navio-S используется для получения значений частоты опорного генератора, которые прогнозируются и передаются в навигационном сообщении.

Для управления комплексом, в соответствии с [19], создана специальная программа. Функции, выполняемые программой, подробно описаны в [18].

При наблюдениях регистрируется 780 последовательных показаний разницы “местная шкала времени – исходный сигнал приёмника”. Результаты обрабатываются по методу наименьших квадратов. При этом учитываются следующие поправки:

- а) геометрическое запаздывание, полученное из координат наземной антенны и эфемерид навигационного спутника Земли (НСЗ), которые устанавливаются при наблюдении;

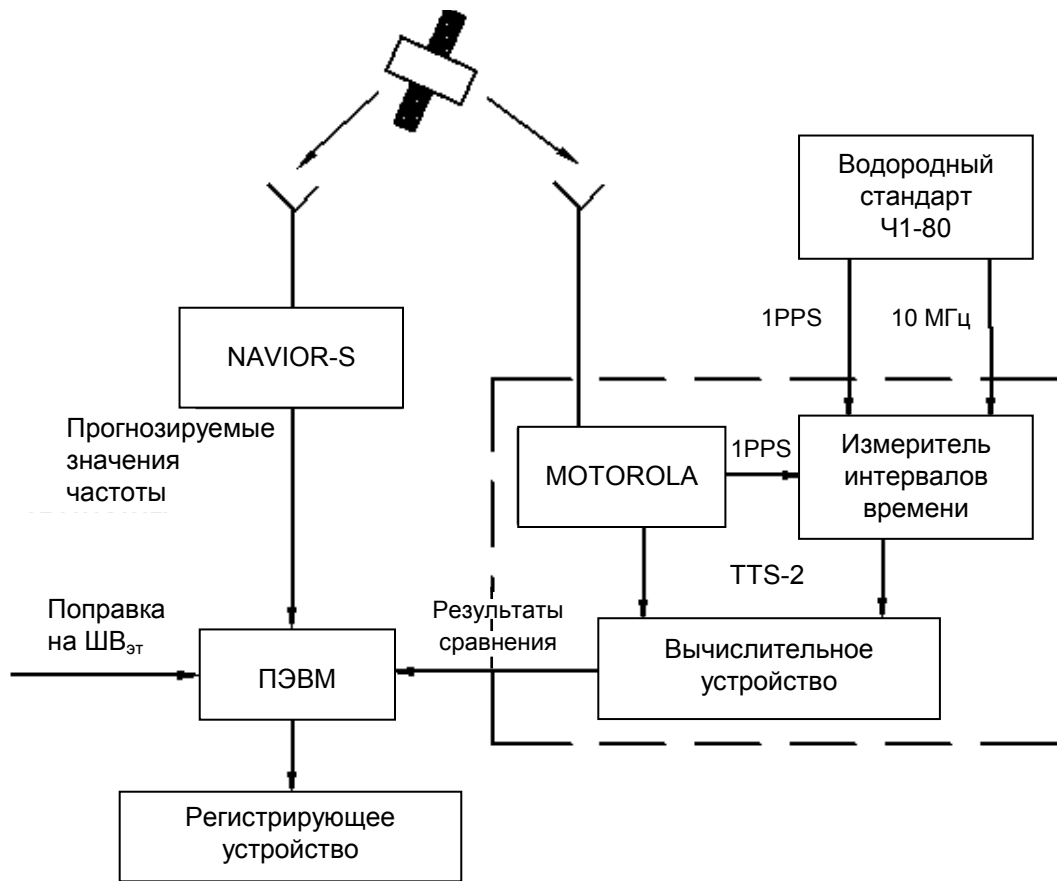


Схема определения частоты опорного генератора GPS-спутника

- б) запаздывание в ионосфере, полученное из параметров навигационного сообщения;
- в) запаздывание в тропосфере;
- г) поправка Саньяка;
- д) периодическая релятивистская поправка вследствие эксцентриситета орбиты спутника (постоянная релятивистская поправка к частоте из-за гравитационного красного смещения и эффекта Доплера второго порядка устанавливается перед запуском спутника как частотный сдвиг опорного бортового генератора);
- е) поправка радиовещания L1–L2;
- ж) запаздывание в приемнике;
- з) запаздывание в антенне и кабеле приемного комплекса.

В результате получается значение REFSV – расхождение рабочей шкалы времени эталона и бортовой шкалы времени НСЗ. После этого рассчитываются поправки часов для доступа к системной шкале времени GPS, которые формируются как многочлен второго порядка в виде  $a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$ . Значения коэффициентов многочлена передаются в навигационном сообщении НСЗ GPS. В результате получаем значение REFGPS – расхождение рабочей шкалы времени эталона и системной шкалы времени GPS, привязанной к конкретному НСЗ.

Для обработки цифровых данных, которые получают с помощью TTS-2, была разработана

специальная программа по определению действительного значения частоты опорного генератора НСЗ. Описание программы обработки данных в системе компьютерной математики MATLAB приведено в [18].

Было проведено несколько сессий наблюдений для определения относительного отклонения действительного значения частоты опорных генераторов навигационных спутников. В [18] приведены примеры значений полученных результатов, свидетельствующие о том, что такой подход характеризуется погрешностью на уровне  $5 \cdot 10^{-14}$ .

Показано, что когда номинальным значением частоты считают то значение, которое формируется на базе международного группового эталона, который формирует шкалу времени UTC, то в среднем получается более точное значение относительного отклонения частоты, чем при измерениях для каждого бортового генератора навигационного спутника в отдельности (относительная погрешность на уровне  $5 \cdot 10^{-14}$ ).

Полученные результаты указывают на целесообразность рассмотрения других подходов для определения номинального значения частоты группового эталона, составленного из бортовых генераторов навигационных спутников GPS, для которого системная шкала GPS time синхронизируется с Международной шкалой координированного времени UTC.

В рамках одного из таких подходов были проведены испытания приемника Novatel DL-V3, который имеет возможность формировать на выходе сигнал с частотой 5 МГц, синхронизированный по фазе с Международной шкалой координированного времени UTC.

Были проведены исследования долговременных метрологических характеристик сигнала приемника DL-V3 с частотой 5 МГц в соответствии со структурной схемой, приведенной в [20].

На выходе приемника была сформирована импульсная последовательность со скважностью 2 и частотой 5 МГц. После резонансного усилителя-размножителя сигнал синусоидальной формы поступал в частотный компаратор, на второй вход которого поступал опорный сигнал 5 МГц от ведущего генератора государственного эталона. Кроме того, сигнал с частотой 5 МГц со второго выхода усилителя-размножителя поступал на компаратор фазовой системы внутренних сличений первичного эталона.

Сравнительный анализ полученных в [20] результатов свидетельствует о возможности использования режима наблюдений “all-in-view” для решения следующей задачи: при известной частоте водородных стандартов определить действительное значение частоты опорного генератора GNSS-приемника, а соответственно, определить относительное отклонение действительного значения частоты для группового эталона GPS в режиме “all-in-view”.

### Выводы

Результаты проведенных к настоящему времени экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности использования приемника Novatel DL-V3 для решения задач определения действительного значения частоты высокостабильных генераторов на уровне  $(1...2) \cdot 10^{-16}$ . При этом сформированная приемником шкала времени, а соответственно, и синфазная этой шкале частота его внутреннего генератора будут зависеть от гравитационного потенциала в точке приема навигационного сообщения. Такой подход позволяет спланировать и провести эксперимент по определению гравитационного потенциала Земли с применением прецизионных GNSS-приемников (при соответствующей стабильности опорных бортовых генераторов навигационных спутников).

### Список литературы

1. Reigber Ch. CHAMP Mission Status / Ch. Reigber, H. Luehr, P. Schwintzer // *Advances in space research*. – 2002. – Vol. 30, № 2. – P. 129–134.
2. Zhu S. Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data / S. Zhu, C. Reigber, R. Konig // *Journal of geodesy*. – Sept. 2004. – Vol. 78, Issue 1–2. – P. 103–108.
3. Rebhan H. The gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission – GOCE / H. Rebhan, M. Aguirre, J. Johannessen // *ESA Earth observation quarterly* 66: 6–11. – 2000.
4. Пат. 84704 Україна, МПК 7: G01S 5/14. Супутникова радіонавігаційна система / С.А.Матвиєнко. – Заявл. 19.12.05; опубл. 25.11.08.
5. Matvienko S.A. Global monitoring of Earth gravitational field utilizing space navigation systems / S.A. Matvienko // *Proceedings of the 31<sup>st</sup> international symposium on remote sensing of environment*. – 2005.
6. К теории радиофизического метода определения гравитационного потенциала Земли / С.А. Матвиенко, А.В. Мелешко, А.В. Прокопов [и др.] // *Український метрологічний журнал*. – 2009. – № 1. – С. 6–10.
7. Радиофизический метод измерения гравитационного потенциала Земли: состояние и перспективы развития / Г.С. Сидоренко, В.Н. Романько, С.А. Матвиенко [и др.] // *Там же*. – 2011. – № 2. – С. 13–23.
8. Использование ГНСС для экспериментальной проверки теории относительности и определения ускорения силы тяжести по изменению частоты сигнала в гравитационном поле / А.В. Прокопов, В.С. Соловьев, Е.М. Занимонский [и др.] // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2007. – Вип. 1 (13). – С. 84–87.
9. Радиофизический метод измерений ускорения свободного падения с использованием эффекта гравитационного смещения частоты глобальных спутниковых радионавигационных систем / Г.С. Сидоренко, С.А. Матвиенко, В.Н. Романько, А.В. Прокопов // *Український метрологічний журнал*. – 2010. – № 4. – С. 3–11.
10. От релятивистских эффектов в ГНСС до релятивистской геодезии / С.А. Матвиенко, А.В. Мелешко, А.В. Прокопов [и др.] // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2009. – Вип. 1 (17). – С. 41–45.
11. Пат. 98358 Україна, МПК G 01 V 7/16. Спосіб визначення параметрів гравітаційного поля і пристрій для його здійснення / С.А. Матвиєнко, В.М. Романько, О.В. Романько. – Заявл. 03.06.2010; опубл. 10.05.2012.
12. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Велленгоф, Р. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. – 3-тє вид. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наук. думка, 1995. – 380 с.
13. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич. – М.: Радио и связь, 1993. – 286 с.
14. Ashby N. Relativity in the global positioning system / N. Ashby // *Living rev. relativity*. – 2003. – Vol. 6. – P. 1–45.
15. Проект УНТЦ № 3856. Вимір гравітаційного поля Землі за допомогою супутникових навігаційних систем.
16. Радиофизический метод измерения параметров гравитационного поля космических тел

- / С.А. Матвиенко, Г.С. Сидоренко, А.В. Прокопов [и др.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011 – Вип. 1 (21). – С. 91–96.
17. *Матвієнко С.А.* Радіофізичний метод вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі: дис. ... к.т.н. – Дніпропетровськ, 2011. – 183 с.
18. Експериментальні дослідження щодо застосування GNSS-приймача для реалізації радіофізичного методу визначення гравітаційного потенціалу Землі. Частина II / С.А. Матвієнко, А.В. Прокопов, В.М. Романько [та ін.] // Український метрологічний журнал. – 2010. – № 2. – С. 5–12.
19. Попередні випробування GNSS-приймача NovAtel DL-V3 / В.М. Романько, О.В. Прокопов, В.М. Яіцький [та ін.] // Метрологія та вимірювальна техніка: VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія–2008”, 14–16 жовтня 2008 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2008. – С. 187–190.
20. Експериментальні дослідження щодо застосування GNSS-приймача для реалізації радіофізичного методу визначення гравітаційного потенціалу Землі. Частина I / С.А. Матвієнко, А.В. Прокопов, В.М. Романько [та ін.] // Український метрологічний журнал. – 2010. – № 1. – С. 7–13.