

УДК 389.14 (621.371)

## О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТИ ГНСС СТАНЦИЙ

**С. Матвиенко**

Государственное КБ “Южное”, Днепропетровск

**А. Прокопов**

Национальный научный центр “Институт метрологии”, Харьков

**И. Тревого**

Национальный университет “Львовская политехника”

**Ключевые слова:** радиофизический метод, глобальные навигационные спутниковые системы, гравитационное поле Земли, локальная сеть ГНСС станций.

### Постановка проблемы

В настоящее время проблема контроля параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) становится все более актуальной, прежде всего для решения задач геофизики, геодезии, навигации. Для измерения параметров ГПЗ используются разнообразные наземные и космические средства. В качестве наземных средств для локальных измерений параметров ГПЗ в сетях геофизических станций чаще всего применяются гравиметры, обеспечивающие измерение ускорения свободного падения с погрешностью до десятых долей Гал. В известных космических проектах CHAMP, GRACE и GOCE [1, 2] восстановление локальных значений ускорения свободного падения осуществляется с погрешностью до 1 мГал при пространственном разрешении 100 км (проект GOCE). В работах [3–8] предложен радиофизический метод определения гравитационного потенциала Земли, в основу которого положено использование релятивистского эффекта изменения частоты электромагнитного сигнала, распространяющегося в неоднородном гравитационном поле. Для практической реализации радиофизического метода в цитированных работах обоснована целесообразность использования радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Учитывая большие перспективы бурно развивающихся в последние годы сетевых ГНСС технологий, представляет интерес оценить возможность их применения и для решения задачи восстановления пространственной структуры гравитационного поля Земли.

### Анализ последних исследований и публикаций

Использование сетей ГНСС станций позволяет не только повысить точность измерений, но и существенно продвинуться в решении задач мониторинга окружающей среды, в частности мониторинга параметров тропосферы [9, 10]. Прорабатываются также предложения по использованию измерений в сетях ГНСС для определения параметров ионосферы Земли [11]. Предложение по использованию локальных сетей ГНСС станций, к которым относятся уже имеющиеся в Украине [9, 12] сети перманентных и референтных (опорных) станций,

для мониторинга гравитационного потенциала Земли впервые сформулировано в работе [13].

### Изложение основного материала

Рассмотрим, как с помощью измерений в сетях ГНСС станций можно реализовать радиофизический метод измерения параметров ГПЗ.

Для вывода основных уравнений воспользуемся исходными соотношениями радиофизического метода [5–8], которые базируются на известном уравнении теории относительности (описывающем так называемый эффект красного смещения “red shift”), связывающем потенциал  $u_0$  в точке, где сигнал имеет частоту  $f_0$ , с потенциалом  $u_1$  в точке, где частота сигнала равна  $f_1$  [4–6]:

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

где  $c$  – скорость света.

Если частоты  $f_1$ ,  $f_0$  считать непосредственно (или косвенно) определяемыми исходными величинами, то в (1) в общем случае остаются неизвестными как  $u_0$ , так и  $u_1$ . Поэтому необходимо иметь дополнительные к (1) соотношения, связывающие  $u_1$  и  $u_0$ . В качестве таких соотношений можно воспользоваться одной из известных моделей гравитационного поля Земли [14], например, представлением гравитационного потенциала в виде разложения по сферическим гармоникам:

$$u(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} P_m(\sin \theta) \times \quad (2)$$

$$\times [C_{lm} \cdot \cos(m\lambda) + S_{lm} \cdot \sin(m\lambda)],$$

где  $r, \theta, \lambda$  – сферические координаты в системе координат с началом в точке центра масс Земли;  $G, M$  – гравитационная постоянная и масса Земли соответственно;  $R$  – средний радиус Земли;  $P_m$  – присоединенные полиномы Лежандра;  $C_{lm}, S_{lm}$  – коэффициенты разложения, которые определяются по имеющимся экспериментальным данным на этапе построения модели.

Формула (2), с одной стороны, дает нам необходимое дополнительное соотношение, связывающее  $u_1$  и  $u_0$ , поскольку она описывает гравитационный потенциал в произвольной точке околоземного пространства (для этого необходимо, чтобы были известны коэффициенты разложения  $C_{lm}, S_{lm}$ ) и, следовательно, в точках с потенциалами  $u_1$  и  $u_0$ . С другой стороны, если найдены вышеупомянутые коэффициенты, то формула (2) дает решение поставленной задачи определения гравитационного потенциала Земли.

Подставляя (2) в (1), получим уравнение для определения неизвестных коэффициентов  $C_{lm}, S_{lm}$  в формуле (2):

$$\frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r_1}\right)^{l+1} \cdot P_{lm}(\sin \theta_1) \times \left[ \begin{matrix} C_{lm} \cdot \cos(m\lambda_1) \\ + S_{lm} \cdot \sin(m\lambda_1) \end{matrix} \right] = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r_1}\right)^{l+1} \cdot \quad (3)$$

$$P_{lm}(\sin \theta_0) \times \left[ \begin{matrix} C_{lm} \cdot \cos(m\lambda_0) \\ + S_{lm} \cdot \sin(m\lambda_0) \end{matrix} \right] + c^2 \left(1 - \frac{f_1}{f_0}\right),$$

где  $r_1, \theta_1, \lambda_1$  и  $r_0, \theta_0, \lambda_0$  – сферические координаты точек, в которых потенциал принимает значения  $u_1$  и  $u_0$  соответственно;  $f_1$  и  $f_0$  – значения частоты сигнала в этих точках. Координаты этих точек определяются пространственным положением приемников сигналов в сети ГНСС станций и положением ИСЗ, излучающих эти сигналы.

Уравнение (3) даст систему уравнений для определения неизвестных коэффициентов разложения  $C_{lm}, S_{lm}$  с помощью ГНСС-измерений в сети, если его записать для множества точек  $r_{xi}, \theta_{xi}, \lambda_{xi}$  отмеченных индексом  $i=1, 2, \dots, I$  ( $I$  – количество этих точек), соответствующих  $I$  местоположениям приемника ГНСС-сигналов в сети, и  $r_{yj}, \theta_{yj}, \lambda_{yj}$  некоторого множества точек, отмеченных индексом  $j=1, 2, \dots, J$  ( $J$  – количество этих точек), соответствующих  $J$  местоположениям излучателя ГНСС-сигналов (положениям ИСЗ), которые получают в результате перемещения по пространству, соответственно, точек  $r_1, \theta_1, \lambda_1$  и  $r_0, \theta_0, \lambda_0$ . Множество координат вышеуказанных точек определяется экспериментально – из ГНСС-измерений, осуществляемых в сети (если, в соответствии с вышеуказанным, в точках  $r_{yj}, \theta_{yj}, \lambda_{yj}$  размещается источник, а в точках  $r_{xi}, \theta_{xi}, \lambda_{xi}$  – приемник ГНСС-сигнала). Вместо  $f_1$  и  $f_0$  в (3) будет множество значений частот  $f_{xi}$  и  $f_{yj}$ , которые зависят от значения гравитационного потенциала в рассматриваемых точках и которые также необходимо определять экспериментально ( $f_{xi}$  – значения частоты принимаемого в этих точках сигнала,  $f_{yj}$  – значения частоты излучаемого в этих точках сигнала).

Очевидно, что количество экспериментальных точек связано с количеством членов разложения в (2), (3) и требуемой точностью определения  $C_{lm}, S_{lm}$  (эти вопросы должны являться предметом отдельного исследования), поэтому на практике при любом методе построения модели (2) значения индекса  $l$  ограничиваются сверху. То есть вместо  $\infty$  в знаке суммы в выражениях (2), (3) должно стоять некоторое максимальное значение  $l_{max}$ .

Итак, всего мы имеем  $I \cdot J$  уравнений типа (3) для определения неизвестных коэффициентов  $C_{lm}, S_{lm}$ . Количество уравнений должно быть не менее количества неизвестных. Это накладывает ограничения на соотношения между  $I, J, l_{max}$ . Если количество уравнений (3) при  $l = 0, 1, 2, \dots, l_{max}$  больше числа неизвестных, то система уравнений решается методом наименьших квадратов.

### Выводы

Таким образом, показана принципиальная возможность восстановления пространственной структуры гравитационного потенциала Земли на основе измерений, осуществляемых в сети ГНСС станций. В отличие от измерений, которые выполняются с единственным ГНСС-приемником, когда конечным результатом является одномерный профиль гравитационного поля (описывающий зависимость гравитационного потенциала от высоты в точке размещения приемника), измерения в сети позволяют получить трехмерный профиль над территорией, охваченной сетью. Следует подчеркнуть, что это обстоятельство является особо существенным при использовании радиофизического метода определения гравитационного потенциала для решения задач поиска полезных ископаемых. Учитывая несомненные перспективы сетевых режимов радиофизического метода, представляет интерес выполнить дальнейшие исследования, в рамках которых на основе численного эксперимента проанализировать ожидаемые точностные возможности рассмотренного подхода. В частности, обеспечит ли он для имеющихся в Украине локальных сетей ГНСС-станций уровень точности восстановления пространственной структуры гравитационного поля, соответствующий точностям, достигнутым в проекте CHAMP [1]? Или потребуются дополнительные усилия по повышению уровня стабилизации частоты исходных генераторов и повышению точности ГНСС измерений? При подготовке и проведении численного эксперимента можно использовать результаты работ [6–8, 15], в которых выполнен подробный анализ для случая одиночного ГНСС приемника.

### Литература

1. Zhu S. Integrated adjustment of CHAMP, GRACE and GPS data / Zhu S., Reigber C, Konig R. // JOURNAL OF GEODESY. – 2004. –V. 78, Issue 1–2. – P. 103–108. – Available from: <http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/citation.htm1>.
2. Drinkwater M. The GOCE gravity mission: ESA's first core Earth explorer / M. R. Drinkwater, R. Haagmans,

- D. Muzi a. a. // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International GOCE User Workshop, 6–8 November, 2006, Frascati, Italy: ESA Special Publication, SP-627, P. 1–8. Available from [http://esamultimedia.esa.int/docs/GOCE\\_3rd\\_Workshop\\_Drinkwater\\_et\\_al.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GOCE_3rd_Workshop_Drinkwater_et_al.pdf).
3. Matvienko S. Global monitoring of Earth gravitational field utilizing space navigation systems / Matvienko S. // Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 2005.
  4. Патент на винахід № 84704. Супутникова радіонавігаційна система / С. А. Матвієнко.– Заявлено 19.12.2005 р. МПК 7: G01S 5/14.
  5. Prokopov A. Relativistic effects in global satellite navigation systems / Prokopov A., Matvienko S., Meleshko A. et al. // Acta Astronautica. – 2009. – Vol. 64, No 1. – P. 67–74.
  6. К теории радиофизического метода определения гравитационного потенциала Земли / В. Романько, А. Прокопов, Г. Сидоренко, С. Матвиенко, А. Мелешко // Український метрологічний журнал. – 2009. – Вип. 1. – С. 6–10.
  7. От релятивистских эффектов в ГНСС до релятивистской геодезии / В. Романько, А. Прокопов, Г. Сидоренко, С. Матвиенко, А. Мелешко, В. Копыл, И. Тревого, К. Третьяк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – Вип. 1(17). – С. 41–45.
  8. Радиофизический метод измерения параметров гравитационного поля космических тел / С. Матвиенко, Г. Сидоренко, В. Романько, В. Копыл, А. Прокопов, О. Романько, И. Тревого // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – Вип. 1 (21). – С. 91–96.
  9. Каблак Н. І. Дослідження стану тропосфери за результатами ГНСС-вимірювань в мережі активних референційних станцій UA\_EUPOS/ZAKPOS / Н. І. Каблак // Вісник геодезії та картографії.– 2013. – № 4. – С. 3–7.
  10. Бессонов Е. А. Оценка и интерполяция тропосферных задержек с использованием ГНСС-наблюдений сети референционных станций / Бессонов Е. А., Дицкий И. В. // Радиотехника. – 2013. – № 173. – С. 145–152.
  11. Янків-Вітковська Л. М. Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій Західної України / Л. М. Янків-Вітковська // Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій Західної України// Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19. – № 6. – С. 47–52.
  12. ZAKPOS – мережа референційних GPS станцій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakpos.zakgeo.com.ua>.
  13. Матвиенко С. А. О возможности применения радиофизического метода для мониторинга гравитационного поля Земли в сети ГНСС-станций / С. А. Матвиенко, А. В. Прокопов // IX Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія-2014), 15–16 жовтня 2014 р., Харків: наук. праці конф. – Х.: ННЦ Інститут метрології, 2014. – С. 109–111.
  14. Бордовицина Т. В. Теория движения искусственных спутников Земли / Бордовицина Т. В., Авдошев В. А. –Томск: Изд-во ТГУ, 2007. – 178 с.
  15. Матвиенко С. А. Об использовании эффекта “red shift” для восстановления гравитационного потенциала. Анализ требований к точности измерений / С. А. Матвиенко, А. В. Мелешко, А. В. Прокопов и др. // Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія-2008), 14–16 жовтня 2008 р., Харків: наукові праці конференції. – Х.: ННЦ “Інститут метрології”, 2008. – Т. 1. – С. 216–219.
- Про можливість реалізації радіофізичного методу моніторингу гравітаційного поля Землі з використанням мережі ГНСС станцій**  
С. Матвієнко, О. Прокопов, І. Тревого
- Розглянуто можливість визначення просторової структури гравітаційного потенціалу Землі радіофізичним методом у мережі ГНСС станцій.
- Наведено вихідні співвідношення, необхідні для аналізу вимог до точності вимірювань, здійснюваних під час практичної реалізації запропонованого методу.
- О возможности реализации радиофизического метода мониторинга гравитационного поля Земли с использованием сети ГНСС станций**  
С. Матвиенко, А. Прокопов, И. Тревого
- Рассмотрена возможность определения пространственной структуры гравитационного потенциала Земли радиофизическим методом в сети ГНСС станций.
- Приведены исходные соотношения, необходимые для анализа требований к точности измерений, осуществляемых при практической реализации предложенного метода.
- On the possibility of realization of radiophysical method of monitoring the Earth’s gravitational field using the network of GNSS stations**  
S. Matvienko, A. Prokopov, I. Trevoho
- The possibility of determination the spatial structure of the Earth’s gravitational potential by radiophysical method in the network of GNSS stations is considered.
- The initial relationships required to analyze the requirements for the accuracy of measurements made for the practical implementation of the proposed method are proposed.