



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ РАДИОМАЯКОВ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

\*\*Илюшин Я.А., \*Падохин А.М.

\*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

\*\*Институт радиотехники и электроники В.А. Котельникова РАН

*Аннотация:* Представлены результаты численного моделирования эксперимента по интерференционной реф-лектометрической альтиметрии уровня взволнованной морской поверхности по сигналам радиомаяков Глобальных Спутниковых Навигационных Систем. Оценены систематические ошибки определения уровня моря, обусловленные морским волнением. Исследовано влияние частичного затенения профиля взволнованной поверхности при наблюдении радиомаяка в направлениях, близких к горизонтالي.

*Ключевые слова:* численное моделирование, взволнованная морская поверхность

По мере роста антропогенной нагрузки на окружающую среду глобальные изменения в природе и климате, связанные с хозяйственной деятельностью человечества, становятся всё более и более заметными на фоне естественных природных процессов. Систематический мониторинг этих изменений критически важен для обнаружения длиннопериодных вариаций климата и долгосрочных климатических трендов, таких как глобальное потепление, таяние полярных льдов, подъем уровня океана и т.д. Мониторинг глобального уровня поверхности моря всегда имел большое значение для населения прибрежных государств и территорий [1]. Длиннопериодные наблюдения уровня морской поверхности крайне важны для понимания закономерностей его изменения и влияния на все сферы жизни и деятельности в этих районах. В большом числе таких регионов организованы и длительно проводятся местные наблюдения с помощью мареографов, объединенных в глобальные сети мирового масштаба [2,3]. Однако, традиционные мареографические измерения чувствительны не только к изменениям абсолютного уровня водной поверхности, но также и к современным вертикальным движениям земного грунта [4]. Это означает, что эти измерения требуют соответствующей коррекции. В настоящее время для этих целей мареографы на станциях наблюдения, как правило, объединяются с приемниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Интенсивное развитие технологий оперативного мониторинга Земли из космоса к настоящему времени обеспечило широкие возможности для непрерывного регулярного наблюдения ключевых физических параметров атмосферы, океана и поверхности земной суши в глобальном масштабе. Перспективной альтернативой традиционным методам измерений являются системы непосредственной регистрации уровня моря методами интерференционной рефлектометрии. С помощью таких систем оказывается возможным одновременная регистрация изменений уровня моря и смещений береговой суши путем непосредственного определения координат приемной станции штатными средствами ГНСС-позиционирования. Интерференционная рефлектометрия сигналов спутников глобальных навигационных систем [5] представляет собой относительно дешевый метод для местных измерений уровня морской

поверхности, пригодный для применения как на береговых станциях сетей наземного геодезического обеспечения (СНГО), так и в специально организованных обсерваториях глобального мониторинга окружающей среды. Метод основан на наблюдении интерференции падающей и отраженной волны и оценке высоты точки наблюдения над уровнем отражающей поверхности по разности фаз падающей и отраженной волн (рис. 1). При известных с высокой точностью координатах радиоприемного устройства это позволяет определять уровень моря в моменты заходов или восходов спутников над горизонтом. Таким образом, системы ГНСС-рефлектометрии оказываются способными практически полностью заменить комбинированные системы на основе мареографов, снабженных приемниками ГНСС как вспомогательными средствами позиционирования. Этот метод, однако, подвержен влиянию ошибок, связанных с мелкомасштабными возмущениями уровня моря, в т.ч. ветровым волнением. Эти возмущения могут вносить в результаты измерений не только случайные, но и систематические ошибки.

Целью данной работы является исследование влияния морского волнения на точность определения уровня морской поверхности по данным интерференционной ГНСС-рефлектометрии. Для решения поставленной задачи в настоящем исследовании проводится компьютерное моделирование отражения от возмущенной морской поверхности сигналов спутниковых навигационных радиомаяков, в первую очередь спутников глобальной навигационной системы GPS на основной рабочей частоте L1 (1575.42 МГц). В спутниковой интерференционной альтиметрии уровня моря интерес представляют отражения электромагнитной волны от поверхности морского волнения в общем случае не малой по сравнению с длиной волны высоты. Кроме того, отражение происходит при малых углах скольжения, т.е. в направлениях, близких к горизонтали. В такой ситуации известные приближенные подходы к расчету отражения работают плохо, причем в значительной степени выражено затенение профиля поверхности. Наиболее надежным подходом в этом случае являются точные решения электромагнитных уравнений для объекта заданной геометрической формы.

Отражение сигналов радиомаяков глобальных навигационных спутниковых систем от взволнованной морской поверхности исследовано путем численного моделирования методом FDTD.

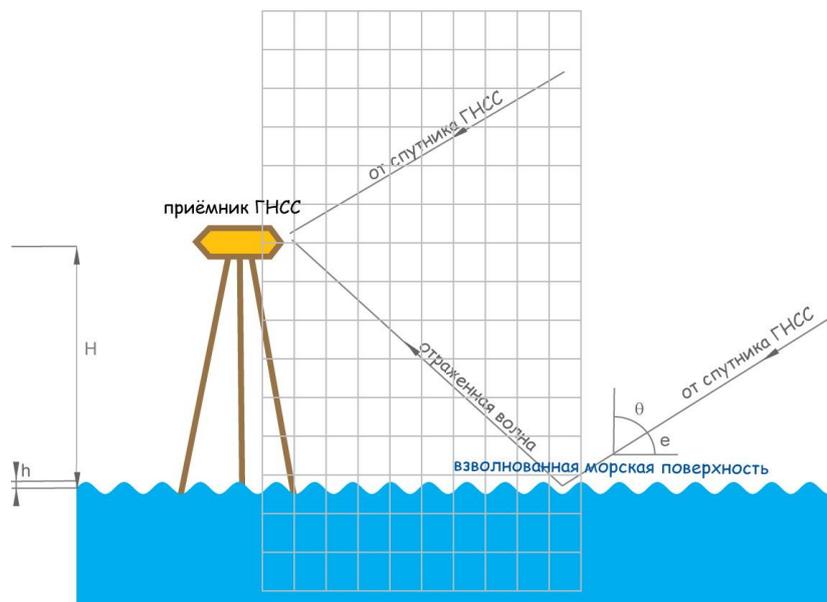


Рис. 1 Схематическое изображение эксперимента по интерференционной рефлектометрии уровня морской поверхности. Область численного расчета поля методом FDTD условно показана сеткой.

Исследуется влияние поверхностных волн на оценку среднего уровня моря, в том числе случайных и систематических ошибок, в первую очередь вызванных частичным затенением

профиля взволнованной морской поверхности при малых углах скольжения падающей волны. Прорабатываются подходы к учету и компенсации ошибок наблюдения на основе ассимиляции данных вспомогательных измерений, включая записи спектров местного ветрового волнения, контекстной фото/видеосъемки окружающей акватории, местных погодных условий (скорости ветра и др.) и так далее. Исследован эффект частичного затенения профиля морского волнения.

Исследованы интерференционные картины поля радиомаяков глобальных спутниковых радионавигационных систем над взволнованной поверхностью моря. По результатам расчетов построены высотные спектры интерференционных картин, максимумы которых соответствуют оцениваемой высоте антенны над уровнем моря. Оценена систематическая ошибка определения уровня морской поверхности, связанная с присутствием ветрового волнения на поверхности моря. Показано, что вызываемая ветровым волнением ошибка оценки уровня практически равна высоте ветрового волнения в пределах ограниченной разрешающей способности метода.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [6]. Исследование поддержано грантом Российского Научного Фонда (РНФ) №17-77-20087.

## Литература

1. J. E. Cohen, C. Small, A. Mellinger, J. Gallup, and J. Sachs, "Estimates of coastal populations," *Science*, vol. 278, no. 5341, pp. 1209–1213, 1997.
2. T. Schöne, N. Schön, and D. Thaller, "IGS tide gauge benchmark monitoring pilot project (TIGA): Scientific benefits," *J. Geodesy*, vol. 83, nos. 3–4, pp. 249–261, 2009.
3. P. L. Woodworth, C. W. Hughes, R. J. Bingham, and T. Gruber, "Towards worldwide height system unification using ocean information," *J. Geodetic Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 302–318, 2012.
4. K. M. Larson, J. S. Löfgren, and R. Haas, "Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver," *Adv. Space Res.*, vol. 51, no. 8, pp. 1301–1310, 2013.
5. Liu W., et al. Coastal Sea-Level Measurements Based on GNSS-R Phase Altimetry: A Case Study at the Onsala Space Observatory, Sweden *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. VOL.55. NO.10. 2017. P.5625
6. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В.: Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", N 7, 2012. С. 36-39.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE REFLECTION OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM BEACON SIGNALS FROM THE WAVES ON THE SEA SURFACE.

Ilyushin Ya.A., Padokhin A.M.

**Summary:** Numerical simulation of reflections of navigational space-borne radio beacons from undulating sea surface is performed at the main frequency of the Global Positioning System (GPS) L1 (1575.42 MHz). Electromagnetic field has been simulated with the Finite Difference in Time Domain (FDTD) technique for different model spectra of the sea waves. Impact of the surface waves on the mean sea level estimate at the monitoring station location is investigated. Random and systematic errors, in particular related to partial shadowing of the undulating surface at low grazing angles of the sounding wave coming from a GPS beacon, are evaluated and estimated.

Approaches to mitigation of the observational errors using auxiliary support data, including local sea waves spectra recorded in situ, context images/footage video of the surrounding aquatory, local weather conditions (wind speed and so on) are discussed.

The research is carried out using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources at Lomonosov Moscow State University. Support from Russian Science Foundation with the grant 17-77-20087 is kindly acknowledged.