

Компьютерное моделирование отражения сигналов радиомаяков глобальных спутниковых навигационных систем от взволнованной поверхности моря.

А.М. Илюшин^{**}, А.М. Падохин^{*}.

^{*}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991 ГСП-2 Ленинские горы ilyushin@phys.msu.ru

^{**}Институт радиотехники и электроники В.А. Котельникова РАН, Моховая 11-7, Москва, 125009, Россия

Введение

Представлены результаты численного моделирования эксперимента по интерференционной рефлектометрической 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 горизонтали.

Numerical simulation of reflections of navigational space-borne radio beacons from undulating sea surface is performed. Electromagnetic field has been simulated with the Finite Difference in Time Domain (FDTD) technique. 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.

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.

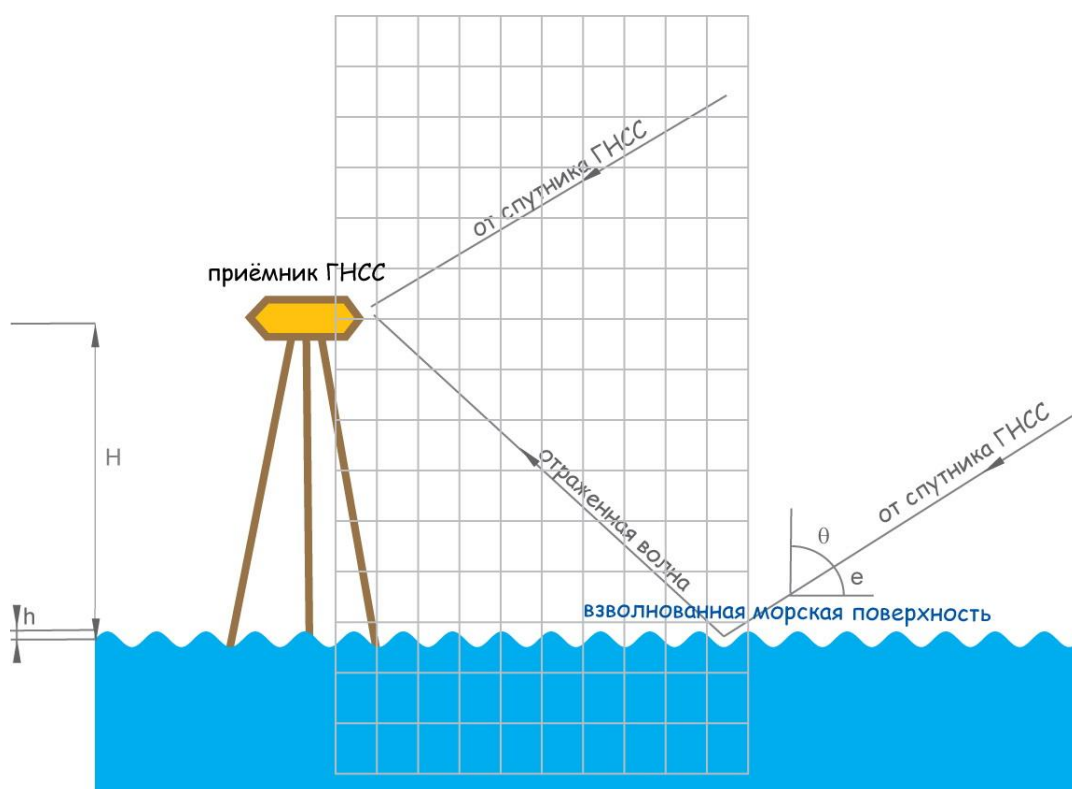


Рис. 1 Схематическое изображение эксперимента по интерференционной рефлектометрии уровня морской поверхности. Область численного расчета поля методом FDTD условно показана сеткой.

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 горизонтالي. 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 [6]. 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.

FDTD и родственные ему пространственно сеточные методы во временной области являются прямыми методами решения роторных уравнений Максвелла. Эти методы не используют каких-либо потенциальных представлений электрических полей. Напротив, они основываются на локальной дискретизации электрического и магнитного полей E и H в пределах исследуемой области пространства за весь период времени. При этом, для адекватного моделирования требуется обеспечить субволновое представление поля на пространственной сетке для самых высоких пространственно-частотных компонент решения. Обычно, достаточно 10-20 шагов на длину волны. Шаг по времени выбирается с учетом условия устойчивости алгоритма, и конечно-разностного дисперсионного соотношения.

В общем целом, FDTD и родственные ему явные пошаговые методы моделируют непрерывное распределение поля электромагнитной волны в ограниченной области пространства его дискретным представлением на сетке. Для исследования полей в неограниченных областях, на границах сетки применяются поглощающие граничные условия, имитирующие выход излучения из рассматриваемого пространства без отражения от границ. Всевозможные явления типа наведенных поверхностных токов, однократного и многократного рассеяния, прохождения через апертуры и возбуждения резонансных полостей моделируются пошаговыми итерациями конечно-разностных аналогов роторных уравнений Максвелла. Достоверность моделирования этих явлений обычно обеспечивается в случае достаточно детальной сетки отсчетов по пространству и времени. На самом деле, целью является обеспечение реалистичного моделирования электромагнитных взаимодействий всех электрически малых ячеек объема области, представляющих поле в исследуемой структуре и ее близлежащей окрестности. В случае больших трехмерных структур (десятки длин волн в каждом из измерений) количество ячеек сетки может достигать десятков и сотен миллионов. Итерации по времени продолжаются до тех пор, пока стационарный режим не установится в интересующей исследователя ячейке области.

При решении уравнений линейной электродинамики, спектры полей и переходных характеристик системы можно получить непосредственным Фурье-анализом полученных решений во временной области. Для высокочастотных систем или областей электрически большого размера может потребоваться длительный промежуток времени моделирования либо экстраполяция результата перед Фурье-преобразованием. Используя метод FDTD и родственные ему методы, к настоящему

времени созданы численные модели взаимодействия электромагнитных волн с объектами с числом неизвестных переменных, значительно превышающим сотни миллионов. На этом уровне сложности оказывается возможным детальное исследование взаимодействия в трехмерном пространстве электромагнитных волн с объектами сложной структуры.

Численное моделирование отражения радиоволн спутников GPS от морской поверхности проводилось для периодического гармонического профиля ветрового волнения. Уравнения Максвелла электромагнитного поля в области и расчетные уравнения разностной схемы приведены в [6]. Геометрия расчетной области показана на рис. 1. Комплексная диэлектрическая проницаемость морской воды рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon' + \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0} ,$$

где ε' - действительная часть комплексной проницаемости среды, σ - проводимость среды, $\omega = 2\pi f$ - циклическая частота, и ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума. Проницаемость и проводимость морской воды соответственно равны 80 и 4 См/м.

На верхней и нижней границах расчетной области размещены идеально согласованные слои, обеспечивающие реализацию граничного условия, соответствующего отсутствию отражения от открытой области среды. На боковых границах области расчета поставлено периодическое граничное условие, соответствующее углу падения волны, приходящей от спутникового радиомаяка. Расчет проводился для линейно-поляризованной падающей волны с вектором напряженности электрического поля, перпендикулярной плоскости падения волны (s-поляризация). Плоскость падения волны совпадает с плоскостью двумерной расчетной области. Хотя практически излучение спутниковых радиомаяков ГНСС имеет, как правило, круговую поляризацию, при отражении от проводящей поверхности происходит значительная деполяризация падающего излучения. В отраженной волне преобладает линейно поляризованная компонента с вектором напряженности электрического поля, перпендикулярным плоскости падения. Таким образом, расчет с линейно поляризованной падающей волной обеспечивает высокую достоверность результатов моделирования при значительной экономии вычислительных ресурсов.

Начальные условия соответствуют отсутствию электромагнитного поля в расчетной области. Таким образом, расчет начинается при нулевых начальных условиях и продолжается до установления стационарного распределения интенсивности электромагнитного поля в области, т.е. установления стационарных стоячих волн и устойчивой интерференционной картины. После этого итерации метода FDTD прекращались, и значения квадратурных компонент поля (действительная и мнимая части комплексной напряженности электрического поля) записывались в выходные файлы результатов, которые сохранялись для дальнейшей обработки.

На уровне предполагаемого размещения приемной антенны станции наблюдения вычислялась средняя интенсивность излучения. Практически в реальном эксперименте изменения профиля взволнованной морской поверхности являются быстрыми по сравнению с изменениями условий падения электромагнитной волны (угла возвышения спутника ГНСС над горизонтом). Поэтому, в эксперименте в действительности происходит эффективное усреднение интенсивности принятого сигнала по множеству конфигураций вертикального профиля морского волнения водной поверхности. Фактически в численном расчете проводилось усреднение интенсивности по всему периоду гармонического профиля ветровой волны, т.е. по всем значениям поперечной

координаты в расчетной области на высоте регистрации поля, т.е. размещения приемной антенной системы. В работе проведено несколько циклов расчетов на высокопроизводительном вычислительном оборудовании

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 [7].

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. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. V.14. 1966. P.302–307.
7. 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.