

# Перспективный высокоточный спутниковый альтиметр

А.И. Баскаков<sup>1</sup>, В.В. Егоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский энергетический институт (Технический университет)

Министерства науки и образования РФ  
105835 Москва, ул. Красноказарменная, 14

E-mail: [BaskakovAI@mpei.ru](mailto:BaskakovAI@mpei.ru)

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: [victor\\_egorov@mail.ru](mailto:victor_egorov@mail.ru)

Рассмотрены методические и технические вопросы проектирования высокоточного спутникового радиовысотомера (ВРВ). Приводится анализ тактико-технических характеристик современных зарубежных спутниковых радиовысотометров. Формулируются основные методические и технические проблемы высокоточной радиовысотометрии и дается описание путей их решения.

## Введение

Проблема создания отечественного спутникового высокоточного радиовысотомера (ВРВ) становится все более актуальной. Такой альтиметр даст возможность проводить прецизионные измерения при работе по зондированию земной поверхности, обеспечивая возможность получения информации для широкого круга пользователей. Среди решаемых с помощью данных ВРВ задач можно выделить: уточнение формы геоида, картирование гравитационных аномалий и аномалий рельефа дна на шельфах, контроль уровня поверхности (приливов, отливов, штормовых нагонов, вихрей, цунами), контроль морских течений, определение высоты морских волн и скорости поверхностного ветра, а также изучение многих других процессов в Мировом океане, связанных с изменением уровня морской поверхности, масштабная привязка данных других бортовых сенсоров дистанционного зондирования (ДЗ) Земли.

Научные результаты, полученные в последние годы с помощью радиовысотометров, установленных на борту ИСЗ “ERS”, “Торех/Poseidon”, “Jason-1”, подтвердили перспективность их использования для дистанционных и, в частности океанографических, измерений. Тактико-технические характеристики зарубежных орбитальных радиовысотометров приведены в табл. 1.

В России в конце 80-х, начале 90-х годов прошлого столетия ОКБ МЭИ проводилась разработка первого отечественного океанографического ВРВ “Гребень”, предназначенного к установке на КС “Мир” в составе научной аппаратуры комплекса “Природа”. Данной разработке в течение ряда лет предшествовал большой объем летных испытаний, проведенных с опытным образцом ВРВ “Гребень” на борту самолета ИЛ-18, - летающей лаборатории Института Радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН. Проведено эскизное и техническое проектирование, выпущен полный комплект конструкторской документации и изготовлены некоторые блоки и приборы.

Анализ табл. 1 показывает, что большинство зарубежных альтиметров имеет среднюю длину волны порядка 2,2 см, что позволяет формировать широкополосный зондирующий сигнал (полоса модуляции более 320 МГц) и обеспечивать высокое разрешение по высоте. В таблице указана лишь величина флуктуационной погрешности (до 2,5 см), хотя суммарная ошибка является гораздо большей и может превышать 10-12 см. Это обстоятельство существенно ограничивает круг потенциальных задач, которые могли бы быть решены по данным спутникового радиовысотомера.

Вместе с тем, последние методические исследования в области космической радиовысотометрии указывают на то, что здесь имеются значительные резервы в части повышения точности альтиметрических измерений посредством внедрения методов когерентного зондирования, использования оптимальных или квазиоптимальных методов обработки эхо-сигнала, адаптации па-

раметров сглаживающих цепей измерителя высоты под решаемые задачи и др. Описание этих методов, закладываемых в проект создания отечественного спутникового радиовысотомера, и являются целью данной публикации.

Таблица 1. Тактико-технические характеристики орбитальных радиовысотомеров

Тактико-технические характеристики	Topex США	Poseidon Франция	ERS Европейское сообщество	Poseidon 2 & 3 (mission: Jason-1, Jason-2)
Средняя высота орбиты, км	1300	1300	800	1336
Несущая частота, ГГц	13,5(Ku)/5,3(C)	13,65	13,5	13,6(Ku)/5,3(C)
Пиковая мощность, кВт	0,02	0,02	0,05	0,02/0,03
Длительность импульса (без сжатия), мкс	102,4	102,4	20	105,6
Девиация частоты, МГц	320	320	330/82,5	320/100-320
Частота повторения, кГц	4/1	1,7	1,0	1,68-1,8/0,3-0,45
Ширина ДНА, град	1,1/3,4	1,1	1,3	1,3/3,4
Точность измерения высоты, м	0,025	0,1	0,1/0,4	0,02
Точность измерения высоты волн (НЗ%), м	0,4±10%	0,5±10%	0,5±10%	0,3±10%
Потребляемая мощность, Вт	70	70	-	70
Масса, кг	-	40	-	60 кг плюс масса антенн 8 кг

### Проблемы спутниковой альтиметрии и пути их решения

Среди основных проблем высокоточной спутниковой радиовысотометрии следует выделить: неоднозначность определения самого измеряемого параметра (высоты), недостаточно высокая точность измерения, влияние ионосферы и атмосферы, слабое использование априорной информации и, наконец, отсутствие разработок по внедрению оптимальных или квазиоптимальных методов обработки эхо-сигнала радиовысотомера. Их подробно рассмотрению проведено в работе [1-3], поэтому ниже остановимся на изложении методических подходов и путей решения указанных проблем, которые были заложены в проект ВРВ.

#### Перспективные методические и технические решения

На основе изложенного выше можно кратко сформулировать следующие перспективные методические и технические решения, способствующие преодолению проблем спутниковой альтиметрии.

1. Повышение энергетического потенциала РВ за счет:

- использования когерентного квазинепрерывного ЛЧМ-сигнала;
- применения алгоритма синтеза апертуры, т.е. сжатия спектра доплеровских частот эхо-сигнала.

Расчеты показывают, что отношение мощности сигнала к мощности шума на входе детектора может быть в этом случае обеспечено не хуже 750, т. е. 28,75 дБ.

2. Увеличение девиации частоты зондирующего сигнала до 250 МГц, т.е. обеспечение полосы модуляции в 500 МГц с применением методов компенсации и учета фазовых ионосферных искажений эхо-сигнала по данным систем GPS/ГЛОНАСС.

3. Использование дискриминатора, работающего по переднему фронту информационного сигнала. Максимальная ошибка смещения при ее коррекции составит 1см, а флуктуационная – 1,39 см. При этом суммарная погрешность измерения высоты может быть снижена до 3-5 см, а точность измерения высоты морских волн доведена до 10 см (см. для сравнения с точностями современных РВ табл. 3).

4. Использование фильтра Калмана в качестве цепи сглаживания мгновенных оценок высоты. Параметры этого фильтра должны выбираться, исходя из априорных сведений об измеряемом процессе, т.е. определяться характером решаемой с помощью данных альтиметра задачи (уточнение формы геоида, обнаружение волн цунами, штормовых зон и др.) с учетом условий измерения высоты и высоты морских волн (данных о полях гравитационных аномалий), а также о текущем состоянии ионосферы, магнитосферы и тропосферы.

5. Имитационное моделирование работы спутникового РВ для:

- отработки новых методических и технических решений, используемых при проектировании, и оценки их влияния на эффективность альтиметрического зондирования;
- оптимизации параметров РВ в ходе его проектирования;
- оценки степени компенсации ошибок смещения, а также минимизации флуктуационных ошибок;
- проведения компьютерных экспериментов, имитирующих работу РВ в период проведения летных испытаний; дований и расчетов
- планирование экспериментов, проводимых в период летных испытаний, и оперативное управление ими. пред

#### *Тактико-технические характеристики проектируемого РВ*

На основе изложенного выше материала, а также результатах предпроектных исследований и расчетов были определены параметры проектируемого РВ, приведенные в табл. 2.

*Таблица 2. Тактико-технические характеристики проектируемого РВ*

Несущая частота, ГГц	13,64 ( $\lambda = 2,2$ см)
Пиковая мощность, Вт	40
Длительность импульса с внутриимпульсной частотной модуляцией, мкс	100
Девиация частоты (полоса модуляции), МГц	250 (500)
Частота модуляции (переменная), Гц	1000-5000
Коэффициент шума приемника	2-3
Ширина ДНА, град	1
Флуктуационная ошибка (по высоте), см	1,4
Суммарная ошибка, см	3-5
Поляризация	круговая
Интервал когерентности, мкс	>60
Масса, кг	40
Потребляемая мощность, Вт	150

### Выводы

1. Большинство современных спутниковых радиовысотометров работает в диапазоне частот 13,5–13,6 ГГц, используя квазинепрерывное излучение с внутриимпульсной ЛЧМ и девиацией

частоты 320 МГц. Суммарная погрешность измерения высоты – 10-12 см. Данные альтиметрии используются при решении ряда научных и прикладных задач океанологии, морского транспорта, экологии, обеспечения безопасности нефтедобычи в акваториях морей и океанов и др.

2. Расширение круга решаемых задач требует снижения суммарной погрешности измерения высоты спутниковыми альтиметрами до 3-5 см. Достижение такой точности связано с рядом проблем методического и технического характера таких, как определение понятия измеряемого параметра (высоты), повышение энергетического потенциала РВ, компенсация ошибок смещения, минимизация динамических и флуктуационных погрешностей измерений, устранение влияния ионосферы и тропосферы, необходимость использования когерентного зондирующего сигнала и реализации процедуры апертурного синтеза и др.

3. Решение перечисленных в п.2 проблем позволит снизить величину ошибки смещения до 1 см, флуктуационной погрешности – примерно до 1,4 см, ошибки, связанной с влиянием ионосферы – до 0,1 см. Суммарная же погрешность с учетом инструментальных ошибок, не должна превысить 3-5 см.

4. Создание в России спутникового РВ нового поколения, в ходе которого будут учтены все методические и технические рекомендации по решению проблем спутниковой альтиметрии, даст возможность преодолеть наметившееся на сегодня отставание отечественных разработок в этой области ДЗ.

### Литература

1. *Егоров В.В., Мин-Хо Ка.* Вопросы точности аэрокосмической альтиметрии // Исследование Земли из космоса, 2005. № 5. С. 48-55.
2. *Min-Ho Ka, Victor V.Egorov.* Ambiguity problem in the Earth's surface altimetry//IEICE TRANS. COMMUN., vol.E90-B, № 11. P. 3232-3236.
3. *Арманд Н.А.* Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах // Радиотехника и электроника, 2003. Т. 48. № 9. С. 1045-1057.