

КОСМИЧЕСКАЯ РАДИОВЫСОТОМЕТРИЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В.В. Егоров

(Институт космических исследований РАН)

Анализируются современное состояние и проблемы космической радиовысотометрии, включающей в себя совокупность методов и средств альтиметрического зондирования земной поверхности. Среди рассматриваемых проблем выделяются проблемы неопределенности измеряемой высоты, учета влияния ионосферы и тропосферы на результаты альтиметрии, неполное использование априорной информации при обработке измерительных данных; слабое внедрение оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки эхо-сигнала радиовысотомера, недостаточно высокая реальная точность измерения высоты. Исследуются возможности и пути решения указанных проблем.

Ключевые слова: *высота, радиовысотомер, неопределенность, точность, ионосфера, априорная информация, оптимальность, синтез апертуры.*

Введение

Космическая радиовысотометрия – одно из быстро развивающихся направлений дистанционного зондирования Земли. Потенциально высокая точность измерения высоты и вертикальной скорости космического аппарата (КА) относительно зондируемой поверхности и отсутствие зависимости от метеоусловий и условий освещенности делают радиовысотомер (РВ) незаменимым инструментом как для выполнения им чисто служебных функций (например, для масштабной привязки данных, получаемых другими бортовыми приборами, создания цифровой модели местности и др.), так и для решения самостоятельных научных задач: уточнение геоида, картирование гравитационных аномалий морской поверхности (МП), изучение ее уровня и течений, аномалий рельефа дна на шельфе, определение высоты морских волн и скорости приповерхностного ветра, а также многих других процессов в Мировом океане, связанных с измерением уровня МП.

Другой важной областью научного применения РВ, входящих в состав бортовых комплексов посадочных модулей, является исследование рельефа и микронеровностей поверхности Луны и планет солнечной системы. Специфика построения и функционирования таких устройств в сравнении с орбитальными РВ (малые высоты и скорости, отсутствие влияния ионосферы и тропосферы и т. п.) требует их отдельного рассмотрения. Поэтому ниже рассматриваются лишь орбитальные радиовысотомеры.

Решение указанных выше задач возможно лишь при высокой разрешающей способности и точности измерения высоты радиовысотомером. Для этого используется широкополосный СВЧ-радиосигнал, обладающий наносекундной разрешающей способностью. Повышение точности альтиметрических измерений до 3 – 5 см на стокилометровой подспутниковой трассе при наличии ук-

лона МП в 10^{-6} позволяет определять отклонения уровня поверхности моря от геоида, детально исследовать вихревую структуру общей океанической циркуляции и своевременно обнаруживать разрушительные волны цунами [1]. В то же время, в ряде работ [2] указывается на необходимость измерения высоты ИСЗ с точностью выше 2 см, что в настоящее время достаточно проблематично.

В этих условиях необходимо четко определить, что понимается под термином высота полета КА и какова предельная точность ее измерения, для того чтобы потребители такой информации не испытывали иллюзий. Действительно, сама зондируемая РВ земная поверхность имеет случайный и/или стохастический характер, что, естественно, вносит неопределенность в оценку высоты [3]. Реальная же точность измерения высоты будет зависеть еще от многих других факторов: внутренних шумов приемника, динамики полета КА, влияния ионосферы и тропосферы и т. д.

В связи с этим цель настоящей работы – дать анализ современного состояния космической радиовысотометрии, сформулировать и обосновать ее наиболее актуальные проблемы и наметить конкретные пути их решения.

Современное состояние космической радиовысотометрии

Эксперименты с использованием радиовысотомеров, устанавливаемых на ИСЗ, были начаты в 1974 г. на американской космической станции Skylab. Затем они были продолжены на космических аппаратах Geos-C, Seasat, Geosat, ERS, Topex/Poseidon, Jason-1 [4, 5]. Результаты экспериментов подтвердили перспективность использования радиовысотомеров для дистанционных океанографических измерений. Тактико-технические характеристики орбитальных РВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тактико-технические характеристики орбитальных РВ

Тактико-технические характеристики	Seasat-A США	Geosat-A США	Topex США	Poseidon Франция	ERS Европейское сообщество	MOS-2 Япония (в разработке)	Poseidon 2 & 3 (mission: Jason-1, Jason-2)
Средняя высота орбиты, км	800	800	1300	1300	800	570	1336
Несущая частота, ГГц	13,5	13,5	13,5(Ku)/5,3(C)	13,65	13,5	19,8	13,6(Ku)/5,3(C)
Пиковая мощность, кВт	2	0,02	0,02	0,02	0,05	1,2	0,02/0,03
Длительность импульса (без сжатия), мкс	3,2	102,4	102,4	102,4	20	3,2	105,6
Полоса модуляции, МГц	320	320	320	320	330/82,5	320	320/100 – 320
Частота повторения, кГц	1,02	1,02	4/1	1,7	1,0	1,0	1,68 – 1,8/0,3 – 0,45
Угловая ширина ДНА, град	1,6	2,1	1,1/3,4	1,1	1,3	1,5	1,3/3,4
Коэффициент усиления, дБ			44(Ku)/33(C)	44			44(Ku)/33(C)
Точность измерения высоты, м	0,1	0,04	0,03	0,1	0,1/0,4	0,1	0,025
Точность измерения высоты волн (НЗ%), м	1,5 ± 10 %	1,0 ± 10 %	0,4 ± 10 %	0,5 ± 10 %	0,5 ± 10 %	–	0,3 ± 10 %
Точность измерения удельной УЭПР, дБ	2	2	1	1	1	–	1
Потребляемая мощность, Вт	165	130	70	70	–	–	70
Масса (с антеннами), кг	94	86,6	–	40	–	–	68
Время существования, год	1,2	–	3	3	–	–	Планируется до 5 лет

Анализ табл. 1 показывает, что большинство орбитальных РВ обладает весьма близкими параметрами. Так, например, длина волны зондирующего сигнала составляет порядка 2,2 см, что позволяет сформировать узкие диаграммы направленности антенн (ДНА) РВ и обеспечивать относительно слабое влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволны. Добавление второго канала С-диапазона в некоторых образцах РВ позволяет скомпенсировать воздействие ионосферы при прецизионных измерениях высоты. Длительность зондирующих импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) – порядка 100 мкс в полосе около 320 МГц. Выбор такой длительности, несмотря на некогерентный характер зондирующего сигнала, дает возможность иметь достаточный энергетический потенциал РВ и гарантировать однозначный отсчет высоты при ее вариациях на орбите. Полоса модуляции порядка 320 МГц обеспечивает высокое пространственное разрешение РВ и точность измеряемых им параметров. Точность измерения высоты от 4 до 10 см, погрешность оценки величины удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) – 1 дБ, что вполне удовлетворяет требованиям научных исследований.

Остановимся на современном этапе разработки и использования орбитальных РВ.

В декабре 2001 г. был выведен на орбиту франко-американский спутник Jason-1. Его задача – произвести радиовысотометрические замеры уровня МП с высокой точностью. Jason-1 сменил своего предшественника – спутник Topex/Poseidon. С ИСЗ Topex/Poseidon велись наблюдения за развитием урагана El-Nino, благодаря этому спутнику удалось составить более точные топографические карты МП, получить новые данные о высоте волн, скорости приповерхностного ветра, силе приливов, словом всего, что касается эволюции океанов.

Спутник Jason-1 был изготовлен французской фирмой Alcatel-Space и заменил ИСЗ Topex/Poseidon на той же самой орбите. Спутник Jason-1 в несколько раз легче своего предшественника и в три раза дешевле. Преемственность между спутниками фундаментальна, благодаря ей океанографы смогли получить альтиметрические данные за длительный период.

Успехи России в области спутниковой радиовысотометрии гораздо скромнее. Имеется опыт создания и эксплуатации космического геодезического комплекса ГЕОИК, который был введен в эксплуатацию в мае 1985 г. Основной его элемент – космический аппарат ГЕОИК – является одним из спутников серии «Космос», предназначенных для изучения Земли и околоземного пространства. Программа ГЕОИК имела целью получение системы согласованных параметров Земли,

состоящей из фундаментальных геодезических постоянных, геоцентрической системы координат, параметров фигуры и гравитационного поля Земли. КА выводился на близкую к круговой орбиту около 1500 км и наклоном 74 или 83 град. К 1996 г. было запущено десять спутников, оснащенных как радиовысотометром, так и бортовой геодезической аппаратурой: радиотехнической доплеровской системой, ретранслятором радиотехнической запросной системы, системой световой сигнализации и хранения времени, лазерными уголковыми отражателями. В настоящее время эта программа официально не завершена, и сбор траекторной альтиметрической информации по объектам ГЕОИК продолжается.

Фактическое время активного существования каждого КА ГЕОИК составляло от нескольких недель до восемнадцати месяцев. При этом иногда одновременно работало два КА, чаще – один. Точность измерений радиовысотометра (инструментальная ошибка) для разных спутников составила 0,5 – 0,8 м. Рабочая частота – 9,5 ГГц.

В конце 80-х начале 90-х годов XX в. особым конструкторским бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ) по техническому заданию РКК «Энергия» проводилась разработка первого отечественного океанографического

РВ «Гребень», предназначенного к установке на космической станции «Мир» в составе научной аппаратуры комплекса «Природа». Данной разработке в течение нескольких лет предшествовал большой объем летных испытаний, проведенных с опытным образцом РВ «Гребень» на борту самолета ИЛ-18, летающей лаборатории Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН, над различными акваториями страны: Тихим океаном, Охотским, Черным, Каспийским, Карским и Азовским морями. Было проведено эскизное и техническое проектирование, выпущен полный комплект конструкторской документации и изготовлены некоторые блоки и приборы, однако в 1992 г. разработка РВ «Гребень» была прекращена из-за отсутствия финансирования.

Следует сказать, что значения погрешности измерения высоты полета КА, приведенные в табл. 1, отражают лишь ее флуктуационную составляющую. Суммарная же ошибка измерения высоты оказывается существенно больше (табл. 2). Для наглядной иллюстрации прогресса в разработке орбитальных РВ в табл. 2 даны величины основных погрешностей измерения высоты для двух систем «Seasat» (разработка 1978 г.) и «Torex/Poseidon» (разработка 2001 г.).

Таблица 2

Основные составляющие ошибок спутниковых РВ

Основные типы погрешностей	Спутниковый РВ	
	<i>Seasat</i>	<i>Topex/Poseidon</i> (mission: Jason-1, Jason-2)
Флуктуационная ошибка, см	10	2,5
Ионосферные погрешности, см	5	1
Тропосферные погрешности, см		
– сухая тропосфера	3	0,7
– влажная тропосфера	3	1,3
Динамические погрешности, связанные с гравитационными аномалиями на трассе ИСЗ, см	36	10
Погрешности координат станций слежения за орбитой, см	15	5
Погрешности временных отсчетов, см	15	5
Суммарная погрешность	45	12

Как видно из табл. 2 значительный вклад в суммарную погрешность РВ вносят динамические ошибки, наличие которых обусловлено гравитационными возмущениями орбиты КА. Однако методы борьбы с этими ошибками хорошо известны из теории линейной фильтрации [6, 7], использование алгоритмов которой позволяет минимизировать сумму динамической и флуктуационной погрешностей. Данные табл. 2 следовало бы дополнить значениями ошибок смещения, появление которых связано с конечностью угловой ширины ДНА космического РВ и шероховатостью зондируемой поверхности, т. е. зависимостью УЭПР от угла визирования. В результате на вход приемника поступает множество парциальных эхо-сигналов, соответствующих различным наклонным дальностям в пределах пятна ДНА на поверхности. Величина этих ошибок может во много раз превосходить все остальные составляющие суммарной погрешности [8, 9]. Конечно, большая часть этой ошибки может быть скомпенсирована, если априорно известны рассеивающие свойства зондируемой поверхности, т. е. ее УЭПР.

Учитывая сказанное выше, можно констатировать, что РВ космического базирования с суммарной погрешностью измерения высоты менее 10 см пока не имеется ни в России, ни за рубежом. В то же время анализ современного состояния космической радиовысотометрии показывает, что здесь еще скрыты значительные резервы в части внедрения методов когерентного зондирования, использования оптимальных и квазиоптимальных методов обработки эхо-сигнала, адаптации параметров сглаживающих цепей измерителя высоты под решаемые РВ задачи и др.

Проблемы космической радиовысотометрии, возможности и пути их решения

Ниже рассматриваются лишь те проблемы, которые касаются измерения высоты полёта КА, но не интерпретации данных измерений, что в большинстве случаев является прерогативой специалистов различных отраслей наук о Земле, а также потребителей, занятых в различных сферах хозяйственной деятельности.

Среди таких проблем следует выделить следующие:

- неопределенность понятия самого измеряемого параметра, т. е. высоты;
- влияние ионосферы и тропосферы на результаты альтиметрических измерений;
- неполный учет априорной информации, имеющий место при обработке измерительных данных;

- слабое внедрение оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки эхо-сигналов РВ;
- недостаточно высокая реальная точность измерения высоты.

Рассмотрим каждую из этих проблем подробнее.

Неопределенность понятия высоты полета КА. Земная поверхность, высота до которой измеряется бортовыми РВ, имеет трехмерную случайную, а в общем случае и стохастическую топографию с выраженной иерархической структурой [3, 10]. Это обстоятельство затрудняет введение единого определения для высоты полета КА. Очевидно, что высота должна рассматриваться в качестве некоего параметра, для которого значениями переменной являются отсчеты локальных высот, измеряемых вдоль трассы полета КА. Целесообразно, например, принять в качестве такого параметра, т. е. высоты, величину среднего значения для временного ряда измерений, выполненных на определенном участке трассы. Очевидно, что длина такого участка будет варьироваться в зависимости от цели альтиметрии. Например при спутниковом альтиметрическом зондировании Мирового океана, имеющем целью уточнение формы геоида, длина участка осреднения может составлять десятки километров, а соответственно временной интервал – до единиц секунд. С другой стороны, при отслеживании рельефа местности, что имеет место, например, в задачах формирования цифровой модели местности, осреднение должно выполняться на гораздо более коротком участке и соответствующий временной интервал равняться десятым (а иногда и менее) долям секунды. Превышение указанных пространственных или временных интервалов ведет к резкому увеличению динамических ошибок измерения высоты [6, 8].

Суммируя сказанное, целесообразно использовать в качестве определения высоты аналог «простого скользящего среднего», получаемого на выходе двумерного пространственного или временного «окна», на вход которого поступает пространственный (временной) ряд отсчетов локальных высот зондируемой поверхности, случайный характер которым придают неровности земной поверхности. Размеры этого окна варьируются и выбираются, исходя из требований решения той или иной прикладной задачи. В общем случае при известной априорной информации о структуре поверхности алгоритм такой «оконной» обработки сводится к реализации фильтра Калмана [7]. Однако эта нетривиальная задача

требует отдельного рассмотрения. В связи с этим ниже предлагается ограничиться моделью, принятой в [8], т. е. считать, что в пределах заданного «окна» зондируемая поверхность является статистически однородной (изотропной), имеющей гауссовский закон распределения ординат неровностей. Такое допущение часто используется в теоретических (аналитических и модельных) исследованиях [2, 8]. Конечно, на практике, земная поверхность может иметь закон распределения ординат неровностей, отличающийся от гауссовского. Это обстоятельство важно учитывать, например, при изучении процессов рассеяния электромагнитных волн шероховатой поверхностью и при уточнении величины ошибки смещения высоты. Например для взволнованной МП закон распределения ординат морских волн отличается от гауссового, и для высокоточных альтиметрических измерений необходимо учитывать его моменты более высокого порядка [10].

Учёт влияния ионосферы и тропосферы на точность измерения высоты. При распространении радиоволн через ионосферу происходит их поляризационная и фазовая трансформация. Для устранения вредных поляризационных эффектов, вносимых ионосферой, связанных, например, с эффектом Фарадея, достаточно использовать круговую поляризацию зондирующего сигнала [11]. Сложнее обстоит дело с учетом дисперсионных свойств ионосферы, приводящих к дополнительному сдвигу фаз гармоник модуляции радиосигнала, а также к флуктуациям его начальной фазы, сокращающим, например, время когерентного накопления при апертурном синтезе.

Согласно [11, 12], дополнительный сдвиг фаз гармоник спектра радиолокационного сигнала, связанный с дисперсионными свойствами ионосферы, приводит к тому, что форма принимаемого импульса (сигнала на выходе согласованного фильтра), прошедшего через неё, искажается тем сильнее, чем ниже несущая частота и шире спектр зондирующего сигнала. То же происходит и с сигналом на выходе коррелятора, если в качестве зондирующего сигнала используется частотно-модулированное или фазоманипулированное колебание. Для проведения количественной оценки воздействия ионосферы на фазовый сдвиг гармоник эхо-сигнала радиовысотометра воспользуемся результатами работы [13]. Например среднеквадратическое отклонение (СКО) фазового сдвига σ_ϕ для крайних частот спектра, вносимого ионосферой при распространении сигнала

по трассе длиной h от передающей антенны до земной поверхности и обратно к приёмной антенне, может быть рассчитано по формуле:

$$\sigma_\phi \geq \frac{2\pi \cdot 40 \cdot 10^6 \Delta f}{cf_0^2} \int_{h_1}^{h_2} \sigma_e dh, \quad (1)$$

где c – скорость света; f_0 – средняя частота зондирующего сигнала радиовысотометра; σ_e – СКО флуктуаций концентрации электронов в ионосфере, являющееся функцией h , т. е. h_1 и h_2 – нижнего и верхнего пределов интегрирования, соответствующих граничным высотам слоя F_2 ионосферы. Как показано в [13], величина σ_e , помимо частоты, зависит от времени суток и сезона измерений, а также от состояния магнитосферы. Так, например, для случая средних широт, невозмущенной магнитосферы и ночных измерений σ_e может составлять 1 – 5 % от средней концентрации электронов [14]. При этом, согласно [13],

$$\int_{h_1}^{h_2} \sigma_e dh = (5 - 25) \cdot 10^{11} \text{ э/см}^2.$$

Тогда из (1) легко оценить величину σ_ϕ для принятых в РВ значений средней частоты, например, равной 13,64 ГГц и удвоенной девиации – 500 МГц. Она в этом случае будет равна $\sigma_\phi \geq 0,175 \cdot 2\pi$, т. е. 63° . Это означает, что ширина спектра зондирующего сигнала, равная 500 МГц, является предельно возможной, когда вносимый ионосферой сдвиг фаз не приводит к существенному искажению спектра сигнала биений [12]. Однако такой фазовый сдвиг приводит к появлению ошибки измерения высоты равной 0,36 см.

В принципе, указанный сдвиг фаз может быть в значительной степени скомпенсирован [11], если известна величина текущих значений концентрации электронов в ионосферном «столбе», оцененная, например, по данным измерений приемниками GPS [15]. Суть метода компенсации заключается в использовании согласованного фильтра с комплексным коэффициентом передачи $\hat{G}_F(\omega)$, причем $\arg \hat{G}_F(\omega) = -[\arg \hat{S}(\omega) - \phi_i(\omega)] - \omega t_0$, где $\phi_i(\omega) = \phi_0 + \omega\phi_0' + (\omega^2/2)\phi_0'' + (\omega^3/3!)\phi_0''' + (\omega^4/4!)\phi_0^{IV} \dots$; $\omega = 2\pi f$, $\phi_i(\omega)$ – фазовый сдвиг собственно в ионосфере; t_0 – некоторое, не зависящее от частоты, время задержки. В результате использования этого метода может быть достигнуто следующее значение относительной эффективной полосы модуляции эхо-сигнала:

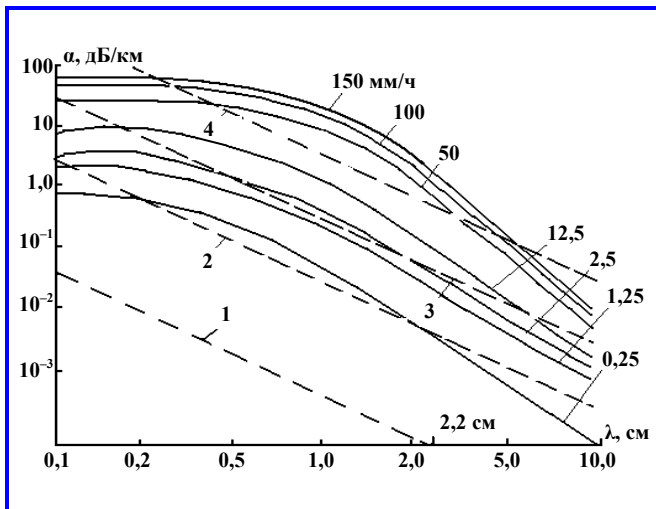


Рис. 1. Зависимость затухания радиоволн сантиметрового диапазона α от длины волны при различных значениях интенсивности осадков (сплошные линии) и водности облаков (пунктирные линии): 1 – водность облачности – 10^{-2} г/м³; 2 – 10^{-1} г/м³; 3 – 1 г/м³; 4 – 10 г/м³

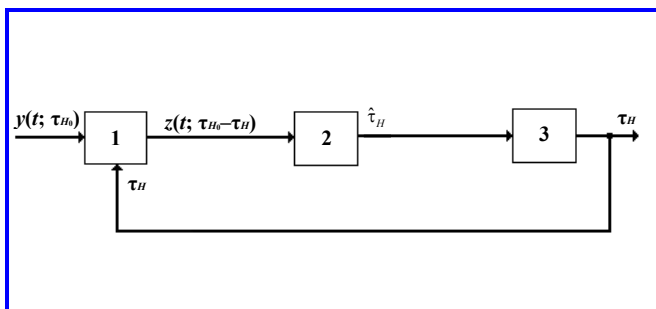


Рис. 2. Блок-схема следящего измерителя высоты, работающего по сигналу биений: 1 – кольцевой смеситель; 2 – дискриминатор; 3 – сглаживающие цепи

$$\left(\frac{\Delta F}{f_0}\right) \leq 88 \left(\frac{f_0 \Phi_{4\max}}{\pi N_\Sigma}\right)^{1/4}, \quad (2)$$

где ΔF – эффективная полоса спектра модуляции сигнала, после осуществления процедуры фазовой коррекции; f_0 – средняя частота сигнала; $\Phi_{4\max}$ – максимальная фазовая ошибка компенсации фазового сдвига, определяемая четвертым членом разложения $\phi_i(\omega)$; $N_\Sigma = 10^{18}$ м⁻² – общее содержание электронов в трубке с поперечным сечением 1 м². Расчеты, произведенные по формуле (2), показывают, что величина ΔF для случая РВ равна 500 МГц, а дополнительная ошибка измерения высоты, связанная с влиянием ионо-

сферы, может быть снижена до величины 0,1 см. Для сравнения укажем, что ионосферная погрешность высотомера ИСЗ Торех/Poseidon равна 1 см (см. табл. 2).

Флуктуации начальной фазы сигнала, прошедшего через ионосферу, существенно сказываются на возможностях РВ осуществлять синтез апертуры вдоль трассы полета носителя. Например, в [14] указывается, что интервал пространственных неоднородностей ионосферы, обусловленных случайными изменениями концентрации электронов в вертикальном «столбе», составляет от 5 до 75 км, а спектр временных флуктуаций имеет полосу порядка 1 Гц. Это означает, что в худшем случае время когерентного накопления эхо-сигнала для спутникового носителя при скорости 7,5 км/с составит $5/7,5 = 0,67$ с. Однако даже при таком времени накопления имеется потенциальная возможность значительно сжать доплеровский спектр эхо-сигнала, существенно повысив продольную разрешающую способность РВ по облучаемой поверхности, что особенно важно при работе по льдам или земной материковой поверхности. Строгое решение этой задачи требует использования всей полноты априорной информации о состоянии ионосферы и магнитосферы Земли.

Известно, что в нижних слоях атмосферы (тропосфере) происходит поглощение радиоволн свободными молекулами газов и аэрозольными частицами (особенно дождевыми каплями при интенсивных осадках), а также изменение скорости распространения электромагнитных волн. Так, например, уменьшение напряженности электромагнитного поля радиосигнала, распространяющегося в поглощающей среде, происходит быстрее, чем по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния, относящемуся к свободному пространству. Этот эффект необходимо учитывать при работе РВ над взволнованной поверхностью моря, когда отношение сигнала к шуму невелико.

Рассмотрим вопрос о затухании электромагнитных волн сантиметрового диапазона в дождях и облаках различной водности. В работе [16] приводится график удельного затухания волн сантиметрового диапазона в зависимости от длины волны для различных значений интенсивности дождя, а также кривые затухания в облаках различной водности (см. рис. 1). Из графика следует, что электромагнитная волна при $\lambda = 2,2$ см может иметь достаточно сильное затухание в интенсивных осадках (до 6 – 7 дБ/км). Например, если верхняя

граница осадков равна 2 км, то величина затухания составит 12 – 14 дБ. Удельное затухание в облаках, даже высокой водности, значительно меньше, чем в интенсивных дождевых осадках, и кроме того, облачность не имеет такой большой толщины как дождь. В связи с этим влиянием облачности на затухание волн 2,2 см диапазона можно в первом приближении пренебречь. Что же касается величин погрешностей измерения высоты, связанных с изменением скорости распространения электромагнитной волны через тропосферу, то они составляют 0,7 см для сухой тропосферы и 1,3 см для влажной (см. табл. 2).

Учет априорной информации в процедуре сглаживания оценок высоты. Оптимальная или квазиоптимальная обработка когерентного сигнала, рассеянного флуктуирующей целью, каковой является земная поверхность, предполагает использование следящего измерителя временной задержки эхо-сигнала. Такой измеритель состоит из кольцевого смесителя 1, дискриминатора 2 и цепей сглаживания 3 мгновенных оценок высоты последней (рис. 2).

На рис. 2 введены следующие обозначения: $y(t, \tau_{H_0})$ – сигнал на выходе коррелятора (кольцевого смесителя), т. е. сигнал биений, состоящий из смеси полезного сигнала и шума; $z(t, \tau_{H_0} - \tau_H)$ – сигнал рассогласования между истинной задержкой эхо-сигнала τ_{H_0} , пропорциональной высоте полета H_0 и измеренной τ_H , которая соответствует текущей оценке высоты H ; $\hat{\tau}_H$ – мгновенное значение оценки высоты.

Оптимизация цепей сглаживания, имеющая своей целью минимизацию суммы флуктуационной и динамической ошибок измерения задержки (высоты), производится на основе результатов решения интегрального уравнения, типа уравнения Винера. Эта задача для различных частных случаев была решена в работе [6]. В режиме точных измерений параметра (высоты), когда отклонения измеренных значений от истинного невелики, дискриминатор может считаться линейным. В этом случае задача фильтрации параметра при его стохастическом изменении во времени решается с помощью алгоритма Калмана [7]. Измеряемая РВ последовательность значений высоты полета носителя и высоты морских волн является стохастическим процессом, который для простоты рассмотрения удобно принять гауссовым, что во многих практических случаях является справедливым. При этом характер этого процесса может изменяться в зависимости от конкретной решаемой задачи, наличия гра-

витационных аномалий на трассе измерения, состояния ионосферы, тропосферы и магнитосферы Земли. Например, при уточнении формы геоида, заданной его моделью, или при отслеживании изменений высоты, связанных с известными гравитационными аномалиями, временной ряд измерений можно представлять как квазидетерминированный нормальный процесс со случайными, но постоянными параметрами [6]. Это означает, что время измерения может быть выбрано достаточно большим, а точность измерения высоты будет предельно высокой. При этом динамическая ошибка будет иметь минимальную величину. В другом случае, при изучении пространственной структуры морского волнения на больших площадях, измеряемый параметр (высота) может представляться стационарным случайным процессом, и тогда фильтр сглаживания будет иметь постоянные параметры, значения которых зависят от отношения сигнал/шум и статистики сигнала на выходе дискриминатора радиовысотомера. Таким образом, параметры фильтра Калмана должны выбираться, исходя из априорных сведений об измеряемом процессе, т. е. определяться характером решаемой задачи с помощью данных альтиметра.

Слабое внедрение оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки эхо-сигнала. Современными спутниковые РВ, устанавливаемые на КА Topex/Poseidon, Jason-1, 2 и др., используют некогерентное зондирующее излучение, что исключает реализацию межпериодного накопления и апертурного синтеза в процедурах обработки эхо-сигнала. Следствием этого является существенное уменьшение отношения сигнал/шум на входе детектора и увеличение флуктуационных ошибок РВ.

Однако не следует забывать и об ошибках смещения, вызываемых конечной шириной ДНА, ее угловыми вариациями, вызванными неидеальностью стабилизации носителя, неточностью знания текущей величины УЭПР зондируемой поверхности в момент измерения и в ряде случаев негауссовым характером структуры рельефа суши или морского волнения. Эти ошибки по своей величине могут существенно превосходить ошибки флуктуационные. Вместе с тем, они легче поддаются компенсации, например, за счет применения «локальной» обработки спектра сигнала биений на выходе корреляционно-фильтровой схемы (по максимуму или переднему фронту спектра) в дискриминаторе радиовысотомера [8]. Сказанное выше делает актуальной задачу синтеза оптимального дискриминатора, либо выбора его квазиоптималь-

ной версии. Алгоритм оптимального дискриминатора может быть записан в виде [6]

$$z(t) \equiv \frac{\partial P(y/\tau_H)}{\partial \tau_H},$$

$$\text{где } P(y/\tau_H) = C \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T W(t_1, t_2, \tau_H) y(t_1) y(t_2) dt_1 dt_2 \right\} -$$

функционал правдоподобия; C – нормировочная константа; T – время измерения; $W(t_1, t_2, \tau_H)$ – функция, обратная корреляционной функции преобразованного сигнала (сигнала биений) $y(t_1)$; t – текущее время. Алгоритм оптимального дискриминатора реализуется в цифровом виде. Схемы квазиоптимальной обработки спектра сигнала биений в дискриминаторе даны в работе [8]. Они сводятся к двум алгоритмам: оценки частоты максимума или частоты максимальной крутизны спектра сигнала биений. Аналогичные алгоритмы используются во временных дискриминаторах, когда оценивается момент времени, соответствующий максимуму или максимальной крутизне отклика при согласованной фильтрации эхо-сигнала.

Вопросы точности измерения высоты. Необходимо определить, во-первых, предельные значения точности измерения высоты, на которые в принципе могут рассчитывать потенциальные потребители высотомерных данных, и, во-вторых, оценить насколько близко современные спутниковые РВ по своим точностным характеристикам приближаются к оптимальным, обладающим предельными точностями. Так в работе [3] приведены формулы для расчета предельной флуктуационной погрешности измерения высоты, величина которой определяется исключительно статистическими свойствами зондируемой поверхности и объемом выборки независимых отсчетов высоты:

$$\sigma_H^2 = \frac{\sigma_Z^2}{N},$$

где σ_H^2 – дисперсия предельной ошибки; σ_Z^2 – дисперсия ординат неровностей зондируемой поверхности; N – число независимых отсчетов высоты в пределах площади измерений по трассе полета КА.

В условиях, приближенных к практике, при которых возникает ошибка смещения и существ-

венно возрастает предельная флуктуационная погрешность измерения высоты, согласно [3], для условий эксперимента РВ Торех/Poseidon получим, что ошибка смещения будет равна 28 см, а флуктуационная – 1,39 см. При известных значениях УЭПР поверхности первая из них может быть уменьшена до единиц сантиметров, что касается флуктуационной ошибки, то она по своей величине достаточно близка к той, что получена в реальном эксперименте (см. табл. 2). Для компенсации значительной доли ошибки смещения и минимизации флуктуационной погрешности необходимо использовать дискриминатор РВ, работающий по переднему фронту информационного сигнала на выходе оптимального приемника. Использование такого дискриминатора позволит получить значения точности близкие к указанным выше. Следует также сказать, что флуктуационная погрешность РВ зависит от собственных флуктуаций эхо-сигнала и наличия шумов. При слабом эхо-сигнале, например, при полете КА над взволнованной поверхностью моря, отношение мощности сигнала к мощности шума приемника может быть невелико и потребует обязательного учета шумовых ошибок РВ. Для увеличения отношения сигнал/шум можно использовать метод синтеза антенной апертуры, что позволит существенно увеличить энергетический потенциал РВ и повысить его продольную разрешающую способность по облучаемой поверхности. Такой подход к проектированию РВ является новым, не реализованным в практике спутниковой радиовысотометрии, однако это предполагает использование когерентного зондирующего сигнала и усложнения алгоритма обработки эхо-сигнала.

Перспективные методические и технические решения

На основе изложенного выше можно кратко сформулировать следующие перспективные методические и технические решения, способствующие преодолению проблем спутниковой высокоточной радиовысотометрии:

1. Повышение энергетического потенциала РВ за счет использования когерентного квазинепрерывного ЛЧМ сигнала и применения алгоритма синтеза апертуры, т. е. сжатия эхо-сигнала по спектру доплеровских частот.

2. Увеличение ширины спектра зондирующего ЛЧМ сигнала до 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 (сигнала на выходе оптимального приемника). Максимальная ошибка смещения после ее коррекции составит 1 – 2 см, а флуктуационная 1,39 см. При этом суммарная погрешность измерения высоты может быть снижена до 4 – 5 см, а точность измерения высоты морских волн доведена до 10 см (см. табл. 1).

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 РВ задачи (уточнение формы геоида, обнаружение волн цунами, штормовых зон и др.) с учётом 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 [17] для отработки новых методических и технических решений, используемых при проектировании, и оценки их влияния на эффективность радиозондирования: оптимизация параметров РВ в ходе его проектирования; оценка степени компенсации ошибок смещения, а также минимизация флуктуационных ошибок; проведение компьютерных экспериментов, имитирующих работу РВ в период проведения лётных испытаний; планирование экспериментов, проводимых в период лётных испытаний, и оперативное управление ими.

Выводы

1. Большинство современных спутниковых РВ работает в диапазоне частот 13,5 – 13,65 ГГц, используя квазинепрерывное излучение с внутриимпульсной ЛЧМ и девиацией частоты 320 МГц. Суммарная погрешность измерения высоты составляет 10 – 12 см. Данные, полученные РВ, используются при решении ряда научных и прикладных задач.

2. Расширение круга решаемых задач требует повышения суммарной точности измерения высоты спутниковыми РВ до 4 – 5 см, достижение которой 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 из-

мерений, устранение влияния ионосферы и тропосферы, необходимость использования когерентного зондирующего сигнала и реализации процедуры синтеза апертуры антенны РВ и др.

3. Создание в России космического РВ нового поколения, в ходе которого будут учтены все методические и технические рекомендации по решению проблем спутниковой радиовысотометрии, даст возможность преодолеть наметившееся на сегодня отставание отечественных разработок в области космических систем дистанционного зондирования Земли.

Литература

1. Баскаков А.И. Прецизионный океанографический радиовысотометр космического базирования / А.И. Баскаков. – М.: МЭИ (ТУ), 1994. – 75 с.
2. Балтер Б.М. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг. Коллективная монография / Балтер Б.М., Ведешин Л.А., Егоров В.В. [и др.]; под ред. А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
3. Вопросы точности аэрокосмической альтиметрии / В.В. Егоров, Ка Мин-Хо // Исслед. Земли из космоса. – 2005. – № 5. – С. 48 – 55.
4. Kremer H.J. Observation of the Earth and its environment: survey of missions and sensors // H.J. Kremer. – Oberpfaffenhofen, 1993. – 476 p.
5. Centimetric Sea Surface Height Accuracy Using the Wide-Swath Ocean Altimeter / E. Rodriguez, B.D. Pollard // Proceedings of IGARSS 2003. – Toulouse, 2003. – P. 21 – 25.
6. Бакут П.А. Вопросы статистической теории радиолокации: в 2 т / П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов [и др.]. – М.: Сов. Радио, 1964. – Т. 2. – 1087 с.
7. A new approach to linear filtering and prediction problems / R.E. Kalman // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 33 – 45.
8. Жуковский А.П. Теоретические основы радиовысотометрии / А.П. Жуковский, Е.И. Оноприенко, В.И. Чижов; под ред. А.П. Жуковского. – М.: Советское радио, 1979. – 320 с.
9. Использование уточненной модели отражения от морской поверхности для анализа погрешностей смещения прецизионного радиовысотометра космического базирования / А.И. Баскаков, К.Н. Морозов // Исслед. Земли из космоса. – 1998. – № 2. – С. 34 – 37.
10. A fractal model for the sea state bias in radar altimeter / D.E. Bar, Y. Agnon // Nonlinear processes in geophysics. – 1997. – № 4. – P. 213 – 222.
11. О разрешающей способности трансionoсферной РЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли в УКВ-диапазоне волн / В.Б. Штейншлейгер, А.В. Дзенкевич, В.Ю. Минаков [и др.] // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42. – № 6. – С. 725 – 732.

12. Restriction on the Bandwidth of Radio Signals of a Spaceborne Precision Radar Altimeter Due to the Influence of the Ionosphere / Ka Min-Xo, A.I. Baskakov // IEICE Transactions on fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. – Tokyo, 2004. – Vol. E87-A. – № 6. – P. 1318 – 1322.
13. Современная радиолокация: пер. с англ / Под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. Радио, 1969. – 704 с.
14. Крупномасштабные атмосферные возмущения и плазменные неоднородности во внешней ионосфере / Г.Л. Гдалевич, В.Ф. Губский, Н.И. Ижовкина [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 42. – № 2. – С. 257–264.
15. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами / В.Г. Бондур, В.М. Смирнов // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 402. – № 5. – С. 675 – 679.
16. Физические основы дистанционного зондирования Земли из космоса / В.В. Егоров, В.И. Тарнопольский // Материалы международного учебного семинара ООН по применению дистанционного зондирования. – Баку, 1977. – С. 38 – 99.
17. Software package for modeling aerospace monitoring and environmental control («GEODIALOG») / В. Balter, V. Egorov, A. Kanaschenkov [at al.] // Proceeding of 20th ESRI International User Conference. – San Diego, 2000. – P. 1135 – 1144.

Поступила в редакцию 28.02.2011

Виктор Валентинович Егоров, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник,
т. 8 (495) 333-35-89, e-mail: victor_egorov@mail.ru.