

Доплеровские радары посадки космических аппаратов на Луну и планеты Солнечной системы

В.В. Егоров

*Институт космических исследований Российской академии наук,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: victor_egorov@mail.ru*

Рассматриваются методические аспекты измерения высоты и вектора скорости космических аппаратов, предназначенных для мягкой посадки на поверхность Луны и планет солнечной системы. Анализируются погрешности доплеровских измерителей скорости, наклонной дальности и высоты, использующих частотно-модулированный (ЧМ) и многочастотный зондирующие сигналы, а также исследуются ошибки фазового радиовысотомера с широкой диаграммой направленности антенны.

Ключевые слова: фазовый дальномер, радиовысотомер, радиовертикаль, частотная шкала, посадка, точность, шумы, дисперсия, смещение, динамическая ошибка.

Введение

Исследование и последующее освоение Луны и планет солнечной системы предполагает использование режима мягкой посадки космических аппаратов (КА) на их поверхность. Для его реализации требуется проводить высокоточные измерения текущей высоты и вектора скорости КА на конечном этапе посадки. В отечественной и зарубежной литературе указывается на возможность реализации таких процедур с помощью бортовых многолучевых систем доплеровского измерения скорости (ДИС) КА и измерителей наклонной дальности (высоты) до зондируемой поверхности, использующих фазовый метод (Фрайд, 1964, Colby, 1965, Жуковский, Оноприенко, Чижов, 1979, Фитенко, Грановский, Варгафтик, 2008, Фитенко и др. 2008). Такие системы осуществляют, кроме того, построение радиовертикали и потому этот измеритель, входящий в их состав, назван ниже радиовертикантом.

Введем краткое обозначение для такой системы – ДИСДВВ, т.е. доплеровский измеритель скорости, дальности, высоты и радиовертикали.

Бортовые фазовые измерители дальности (высоты) обладают выраженным преимуществом по сравнению с высотомерами малых высот, использующими импульсный или частотно-модулированный зондирующий сигнал, поскольку позволяют измерять сверхмалые высоты вплоть до единиц дециметров. Использование же в фазовом дальномере нескольких частотных шкал (например, три) дает возможность измерять дальности до нескольких километров, т.е. перекрывать четыре декады (Пестряков, 1968).

В дополнение к указанным выше фазовым измерителям наклонной дальности (высоты) следует также рассмотреть целесообразность одновременного применения в качестве резервного устройства фазового многошкального радиовысотомера (РВ) сантиметрового диапазона с широкой диаграммой направленности антенны (ДНА).

Несмотря на очевидную перспективность использования многолучевых доплеровских измерителей скорости и фазовых измерителей наклонной дальности, по-прежнему, остается актуальным вопрос о том: «Какова же реальная точность измеряемых ими параметров при наличии флуктуаций эхо-сигнала, динамики КА и воздействия различного рода помех?» В известной литературе, в частности (Фрайд, 1964, Colby, 1965, Жуковский, Оноприенко, Чижов, 1979, Фитенко, Грановский, Варгафтик, 2008, Фитенко и др. 2008) этому вопросу уделено недостаточно внимания, особенно таким его аспектам, как оценка флуктуационной и динамической погрешности измерения высоты и составляющих вектора скорости, ошибки смещения и т.п.

В связи с этим целью настоящей статьи является краткое описание доплеровских измерителей скорости, фазовых дальномеров и радиовысотомера, устанавливаемых на КА, предназначенных для выполнения мягкой посадки на поверхность Луны и планет солнечной системы, а также анализ их погрешностей.

Принципы работы и построения ДИСДВВ

Указанные в заголовке принципы были сформулированы и разработаны сравнительно давно (Фрайд, 1964, Colby, 1965) однако, несмотря на это, их практическая реализация может считаться довольно скромной – всего несколько сенсоров авиационного и космического базирования. Чаще всего это были просто ДИС, снабжаемые радиовысотомерами. Возможно, такое положение было с технологической сложностью изготовления и обработки данных, получаемых ДИСДВВ. Рассмотрим кратко эти принципы.

Существует два варианта построения ДИСДВВ, общими принципами работы и реализации которых являются:

- фильтрация одной из гармоник эхо-сигнала на промежуточной частоте и использование ее в канале измерения скорости КА;
- применение фазового метода измерения наклонной дальности и высоты КА;
- в случае использования резервного РВ - обеспечение разнеса средних частот на декаду (например, миллиметровых для ДИСДВВ и сантиметровых для РВ) для удовлетворения требований по электромагнитной совместимости;
- реализация процедур цифровой обработки эхо-сигнала после его преобразования на промежуточную частоту.

Кроме того, как показано в работе (Жуковский, Оноприенко, Чижов, 1979), методические погрешности измерения составляющих вектора скорости, наклонной дальности и высоты КА этих вариантов одинаковы при равных технических параметрах таких, как угловая ширина лучей ДНА, их отклонение от нормали к поверхности, время осреднения сглаживающих фильтров и т.п.

Первый вариант предусматривает использование как в ДИСДВВ, так и в резервном РВ частотной модуляции по гармоническому закону. Индекс модуляции зондирующего сигнала обоих сенсоров имеет величину меньшую 1 (Фрайд, 1964, Жуковский, Оноприенко, Чижов, 1979, Фитенко, Грановский, Варгафтик, 2008, Фитенко и др. 2008).

Второй вариант базируется на применении в ДИСДВВ и зондирующего сигнала, состоящего из нескольких (обычно трех) отдельных гармонических составляющих (Colby, 1965, Жуковский и др., 1979).

Вариант 1

ДИСДВВ с частотно-модулированным по гармоническому закону зондирующим сигналом впервые и достаточно подробно был описан в работе (Фрайд, 1964). Отечественный аналог этой системы был разработан в рамках проекта «Фобос-Грунт» и представлен в работах (Фитенко, Грановский, Варгафтик, 2008, Фитенко и др. 2008). Поэтому далее целесообразно изложить лишь основные положения его работы и кратко остановиться на особенностях построения. Что же касается радиовысотомера, то его базовые принципы полностью совпадают с теми, что присущи дальномерному каналу ДИСДВВ. Построение же радиовертикали также представляется очевидным и базируется на вычислении разности дальностей, измеряемых, например, двумя парами дальномерных каналов, антенны в каждой из которых разнесены по азимуту на 180 град. В связи с этим далее основное внимание уделяется именно дальномерным каналам ДИСДВВ с кратким обращением к доплеровскому каналу, работа которого ор-

ганизована по традиционной схеме (Мандуровский, Колчинский, Константиновский, 1975).

ДИСДВВ снабжен трех- или четырехлучевой ДНА (1, 2, 3, 4), оси каждого из лучей которой отклонены на $20^\circ - 30^\circ$ от нормали к зондируемой поверхности (рис. 1). Здесь введены следующие обозначения: θ_A - угол отклонения оси ДНА от надира, H – текущая высота, V – модуль вектора скорости, θ_V - угол между вектором скорости КА и нормалью к поверхности, R_j – наклонная дальность до поверхности Луны (или планеты) в j -ом канале измерителя, O – центр масс КА, XYZ – связанная с ним система координат.

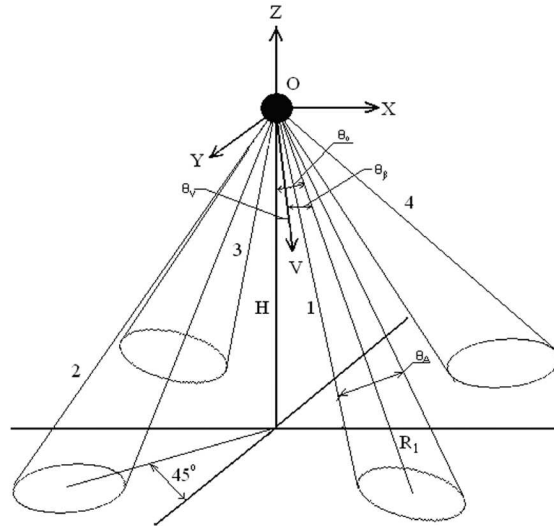


Рис. 1. Расположение лучей ДНА и ориентация вектора скорости КА

Антенная система ДИСДВВ обеспечивает циклический обзор поверхности, посылая по четырем направлениям частотно-модулированный по гармоническому закону сигнал. Сдвиги частоты и фазы гармоник отраженного от поверхности сигнала относительно частоты и фазы гармоник излучаемого колебания дают информацию о скорости и дальности КА относительно отражающей поверхности (Фитенко, Грановский, Варгафтик, 2008). При этом для каждого луча антенны производится расчет составляющих вектора скорости, высоты полета (нормали к поверхности) и углов отклонения вертикальной оси КА относительно нормали к посадочной площадке. Для устранения неоднозначности измерения дальности используются три частоты модуляции. Выбранные значения этих частот обеспечивают на любой высоте (в рабочем диапазоне высот) обнаружение отраженных сигналов не менее, чем на двух частотах модуляции (Фитенко и др., 2008).

Принцип измерения дальности по каждому из четырех лучей ДНА поясняется следующим образом. Эхо-сигнал принимаемый антенной сбивается в кольцевом смесителе либо непосредственно с зондирующим сигналом, либо с последним, смещенным на промежуточную частоту. После такого преобразования одна из гармоник сигнала фильтруется и поступает на вход канала измерения скорости.

Спектр сигнала биений (в случае использования зондирующего сигнала в качестве сигнала гетеродина) представлен на рис. 2а, а на рис. 2б показан спектр сигнала, прошедшего фильтр 1 с последующим возведением его в квадрат. В квадраторе происходит восстановление второй гармоники частоты модуляции, которая затем выделяется фильтром 2, с выхода которого напряжение подается на фазовый детектор, для сравнения его фазы с фазой второй гармоники зондирующего сигнала. За счет распространения зондирующего сигнала до поверхности Луны (планеты) по наклонной дальности R и обратно, разность фаз указанных выше сигналов составит

$$\Delta\varphi_R = \frac{4\pi f_{2M} R}{c},$$

Измеряя с помощью фазометра величину $\Delta\varphi_R$, после соответствующего пересчета из (1) находим значение дальности R .

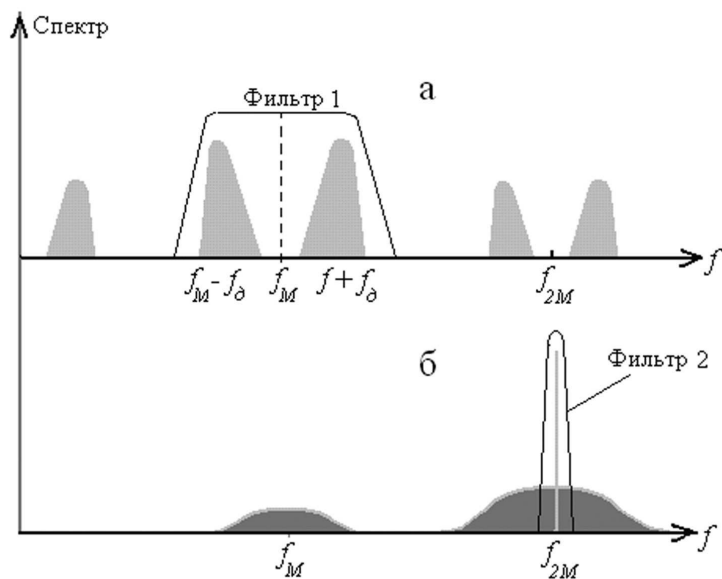


Рис. 2. Спектры эхо-сигнала после его преобразований: а – в кольцевом смесителе; б – в результате фильтрации (фильтр 1) и возведения в квадрат. Здесь f_M – частота модуляции, f_{2M} – частота второй гармоники, f_D – частота доплеровского смещения

Вариант 2

В этом варианте в качестве зондирующего используется многочастотный сигнал (Colby G., 1965). На рис. 3. показан спектр такого сигнала с числом гармоник равным трем, а также спектр эхо-сигнала (закрашен серым цветом).

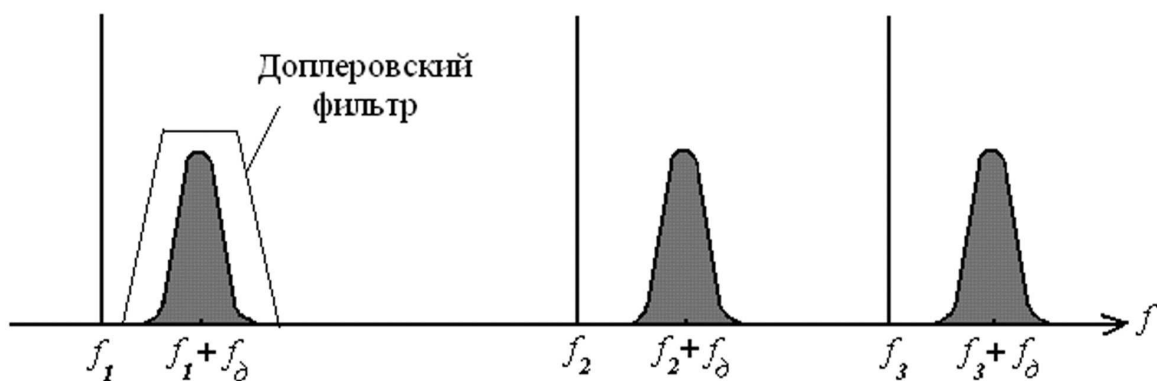


Рис. 3. Спектры зондирующего сигнала и эхо-сигнала. Здесь f_1, f_2, f_3 – частоты гармоник зондирующего сигнала. Доплеровский фильтр предназначен для выделения сигнала, используемого в канале измерения скорости КА

Работа фазового дальномера такого типа основана на использовании нескольких измерительных частотных шкал: точной ($f_3 - f_1$), средней ($f_2 - f_1$) или ($f_3 - f_2$) и грубой, формирующей разность разностей фаз. Для исключения неоднозначности отсчета дальности по мере приближения к плееповерхности Луны (планеты) должен производиться программный переход работы дальномера с грубой шкалы на среднюю и затем на точную (Жуковский и др., 1979). Для измерения разности фаз на точной и средней шкалах доплеровские гармоники эхо-

сигнала попарно приводятся (гетеродинируются) к одной частоте и подаются на фазовые детекторы для измерения разностей фаз, например

$$\Delta\varphi_R = \frac{4\pi(f_3 - f_1)R}{c}.$$

На грубой шкале разность фаз формируется следующим образом:

$$\Delta\varphi_R = \frac{4\pi \cdot [(f_2 - f_1) - (f_3 - f_2)] \cdot R}{c}.$$

Перемножение сигналов двух квазикогерентных доплеровских гармоник в фазовом детекторе практически эквивалентно процедуре возведения в квадрат балансно-модулированного сигнала в варианте 1. При этом в обоих вариантах происходит частичное подавление флуктуаций сигнала, что ведет к одинаковым флуктуационным ошибкам измерений разностей фаз.

Ошибки измерения скорости, дальности, высоты и радиовертикали

Погрешности измерения указанных параметров можно условно разделить на методические (смещения, флуктуационные, динамические), связанные со способом их измерения и аппаратурные, обусловленные наличием тепловых шумов приемника ДИСДВВ, фазовых шумов просачивающегося сигнала передатчика, шумов усилительного каскада передатчика, шумов квантования и т.п. Поскольку максимальная дальность работы ДИСДВВ обычно ограничивается 5 км, а мощность его передатчика составляет порядка 100 мВт, то отношение энергии полезного сигнала к спектральной плотности теплового шума на входе детекторных устройств всех измерителей оказывается большим 30 дБ. Поэтому мощностью тепловых шумов можно, в принципе, пренебречь. Уровень же спектральных плотностей остальных указанных выше шумов, как показывают расчеты, при развязке между приемной и передающей антеннами в 70 дБ на несколько порядков уровня теплового шума. Поэтому далее целесообразно остановиться на рассмотрении именно методических ошибок, формулы для расчета которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Методические ошибки ДИСДВВ

ДИСДВВ	Методические ошибки		
	Смещения	Флуктуационные	Динамические
ДИС	$-3,4 \cdot 10^{-5} V$	$\sigma_V = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2\Delta f_c}{T_3}}$	$\sigma_D = \mu_w T$
Дальномер	$\Delta R \approx R \cdot \left[\frac{\theta_3^2}{2\pi} - \frac{\theta_A^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \arctg(8\mu)} \right) \right]$	$\sigma_R \approx R \cdot \frac{\theta_3^2}{2\pi \sqrt{\Delta f_c T_3}}$	$\sigma_D = \sigma_w T_3^2$
Радиовысотомер	$\Delta H \approx H \cdot \left[\frac{\theta_3^2}{2\pi} - \frac{\theta_A^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \arctg(8\mu)} \right) \right]$	$\sigma_H \approx H \cdot \frac{\theta_3^2}{2\pi \sqrt{\Delta f_c T_3}}$	$\sigma_D = \sigma_w T_3^2$
Радиовертикант	0	$\sigma_\gamma = \frac{\cos^2 \theta_A}{\sqrt{2} \cdot H \sin \theta_A} \cdot \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_D^2}$	$\sigma_D = \sigma_w T_3^2$

В табл. 1 введены следующие обозначения: ΔV – ошибка смещения по скорости, V – скорость КА, ΔR – ошибка смещения по дальности, R – дальность, ΔH – ошибка смещения

по высоте, H – высота, θ_{Σ} – угловая ширина функции, являющейся произведением функции ДНА и функции удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) зондируемой поверхности, θ_A – угловая ширина ДНА, μ – число интервалов разрешения по дальности в пятне облучения ДНА на поверхности, σ_V – ошибка (СКО) измерения скорости, σ_R – СКО измерения дальности, σ_H – СКО измерения высоты, σ_{γ} – СКО измерения угла отклонения радиовертикали от нормали к поверхности, λ – длина волны зондирующего сигнала, Δf_c – полоса флуктуаций эхо-сигнала, примерно равная полосе доплеровского спектра, T_{Σ} – эквивалентная постоянная времени замкнутого следящего измерителя параметра, σ_{DR} – СКО динамической ошибки по дальности, σ_{DV} – СКО динамической ошибки по скорости, σ_{DH} – СКО динамической ошибки по высоте, $\sigma_{D\gamma}$ – СКО динамической ошибки измерения угла отклонения радиовертикали от нормали к поверхности, μ_w – математическое ожидание скачка второй производной от скорости, σ_w – СКО коэффициента полинома при t (время), описывающего процесс $\Delta V(t)$ – изменения скорости после включения измерителя скорости и имеющего физический смысл скачка ускорения, σ_{γ} – СКО коэффициента полинома при t , описывающего процесс $\Delta \gamma(t)$ – изменения положения радиовертикали после включения измерителя и имеющего физический смысл скачка скорости для $\gamma(t)$.

Рассмотрим пример расчета методических ошибок измерителей ДИСДВВ, используя формулы табл. 1 и следующие значения входных параметров: $H = 20$ м,

$V = 3$ м/с, $T_{\Sigma} = 0,1$ с, $\mu_w = 0,1$ м/с³, $\sigma_w = 0,1$ м/с², $\sigma_{\gamma} = 0,1$ рад/с². При расчете динамических ошибок предполагалось, что сглаживающие цепи измерителей состоят из двух интеграторов и корректирующей цепочки. Результаты сведены в табл. 2. Отметим также, что расчет погрешностей измерения вертикальной скорости КА, как производной от высоты, позволил получить следующие значения: ошибка смещения – 0,004 м/с, флуктуационная – 0,04 м/с, динамическая – 0,057 м/с.

Таблица 2. Пример расчета методических ошибок измерителей ДИСДВВ

ДИСДВВ	Методические ошибки		
	Смещения	Флуктуационные	Динамические
ДИС, м/с	$-0,68 \cdot 10^{-3}$	0,012	0,001
Дальномер, м	0,0287	0,004	0,001
Радиовысотомер, м	0,027	0,004	0,001
Радиовертикант	0	0,157	0,057

Анализ табл. 2 показывает, что эти погрешности имеют достаточно малые величины. Для сравнения целесообразно, в частности, обратиться к работе (Фитенко В.В., Грановский В.А., Варгафтик В.Н., 2008), в которой приводятся значения точности измерения высоты, скорости и углового положения радиовертикали для КА проекта «Фобос-Грунт», соответствующие очевидно требованиям технического задания. Они равны: по скорости – 1% V , м/с, по высоте – $\pm 0,3 + 2\% H$, м и 0,6 град (для радиовертикали).

Выводы

1. Доплеровские системы измерения вектора скорости КА, использующие, кроме того, фазовый метод измерения наклонной дальности (высоты), являются наиболее перспективными устройствами, предназначенными для обеспечения информацией блок управления посадочным модулем КА на этапе его посадки.
2. Два возможных варианта построения ДИСДВВ: с ЧМ и многочастотным зондирующим сигналом имеют одинаковые методические погрешности и выбор одного из них определяется большей простотой технической реализации и меньшей стоимостью.

3. Современные требования к точности измерения параметров движения КА: по скорости - 1% V ; по высоте $\pm 0,3$ м + 2% H ; угловой ориентации – 0,6 град могут быть успешно реализованы с помощью ДИСДВВ.

Литература

1. Фрайд У. РЛС непрерывного излучения с частотной модуляцией для одновременного измерения трех составляющих скорости и высоты // Зарубежная радиоэлектроника. 1964. № 11. С. 3-25.
2. Жуковский А.П., Оноприенко Е.И., Чижов В.И. Теоретические основы радиовысотометрии. М.: «Сов. радио», 1979. 320 с.
3. Фитенко В.В., Грановский В.А., Варгафтик В.Н. Посадочный радиолокатор для космического аппарата «Фобос-Грунт» // Научные технологии. № 6. 2008. С. 14-19.
4. Фитенко В.В., Варгафтик В.Н., Зайко Ю.К., Лихачев В.Н. Особенности выбора частот модуляции излучаемого сигнала в посадочном локаторе космического аппарата «Фобос-Грунт» // Научные технологии. 2008. № 8. С. 7-8.
5. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы. М. «Сов. радио». 1968. 352 с.
6. Мандуровский В.Е., Колчинский И.А., Константиновский М.И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / Под ред. В.Е.Колчинского. М.: «Сов. радио», 1975. 432 с.
7. Colby G. Doppler radar altimeter. Pat. USA №3334344. C1 343-7.5 filed 20.09.65.

Doppler radars for the spacecrafts landing on Moon and planets of solar system

V.V. Egorov

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: victor_egorov@mail.ru

Methodic aspects of altitude and velocity measurements of the spacecrafts meant for the soft landing on Moon and planets are considered. The errors of doppler meters of velocity, inclined range and altitude using FM and multi-frequency signals as well as errors of the phase radar altimeter with the wide antenna directional pattern are evaluated.

Keywords: phase radar, radar altimeter, radiovertical, frequency scale, landing, accuracy, noise, variance, bias, dynamic error.