

Национальный исследовательский университет МЭИ

Институт космических исследований ИКИ РАН

**РЛС лунного посадочного модуля:
ошибки измерений дальности, высоты и вертикальной
скорости**

Баскаков А.И., Егоров В.В., Комаров А.А.

РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Цель доклада: Изложение принципов построения РЛС космического посадочного модуля и расчета методических ошибок измерения дальности, высоты и вертикальной скорости.

Решаемые задачи:

1. Выбор метода измерений и структуры зондирующего сигнала РЛС, исходя из условий обеспечения заданной точности и однозначности измерения параметров движения посадочного модуля на завершающем этапе посадки.
2. Разработка блок-схемы многошкального устройства, предназначенного для одновременного измерения дальности, высоты и составляющих вектора скорости посадочного модуля относительно поверхности планеты.
3. Вывод аналитических формул и расчет методических ошибок измерения наклонной дальности и высоты до поверхности планеты, а также составляющих вектора скорости посадочного модуля.

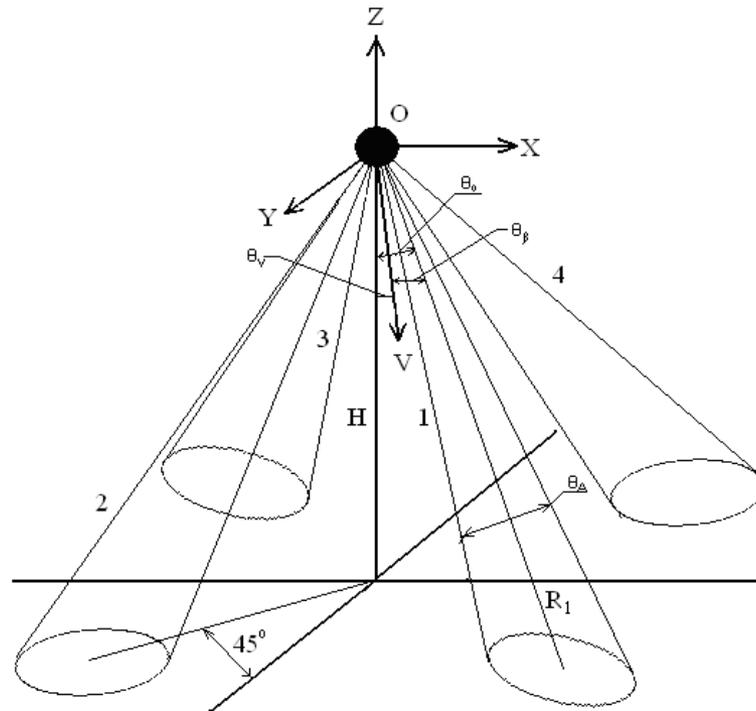
РЛС ого посадочного модуля: ошибки измерений...

Почему именно фазовый метод?

1. Он позволяет измерять наклонную дальность (высоту) до поверхности планеты практически до нулевых значений.
2. Использование зондирующего сигнала в виде набора 3-4 гармоник и измерителя доплеровской частоты эхо-сигнала с дискриминатором с расстроенными частотными каналами дает возможность достижения точности оценки скорости посадочного модуля близкой к потенциальной.
3. Измерение наклонной дальности (высоты) посредством оценки задержки фазы между гармониками эхо-сигнала с помощью цифрового фазометра также обеспечивает практически потенциальную точность оценки указанных параметров.
4. Аппаратурная реализация метода представляется достаточно простой, поскольку при этом используются хорошо отработанные на практике подходы и узлы.

РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Диаграмма направленности антенной системы

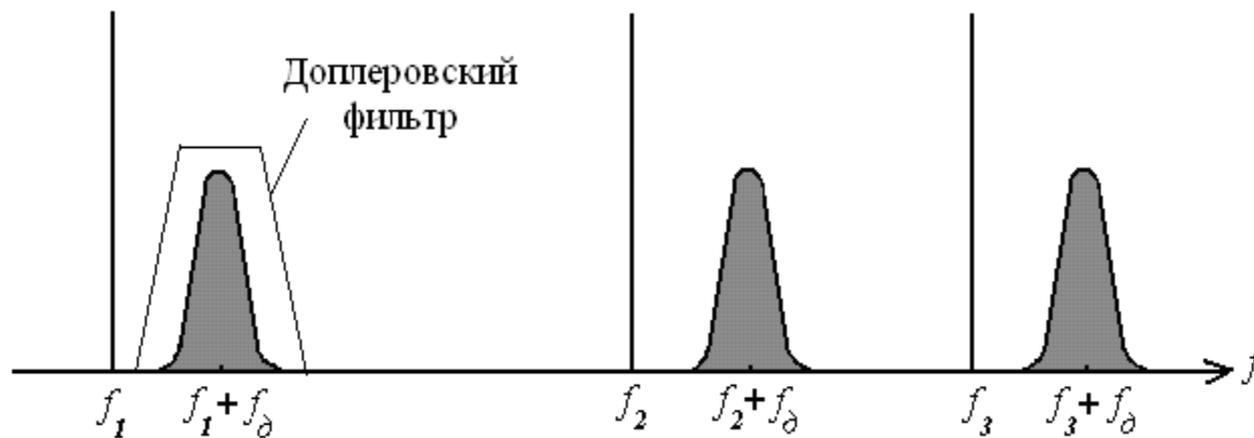


Угловая ширина ДНА – $2,5^\circ$

Отклонение осей ДНА от нормали - 20°

РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Спектры зондирующего и принимаемого сигнала

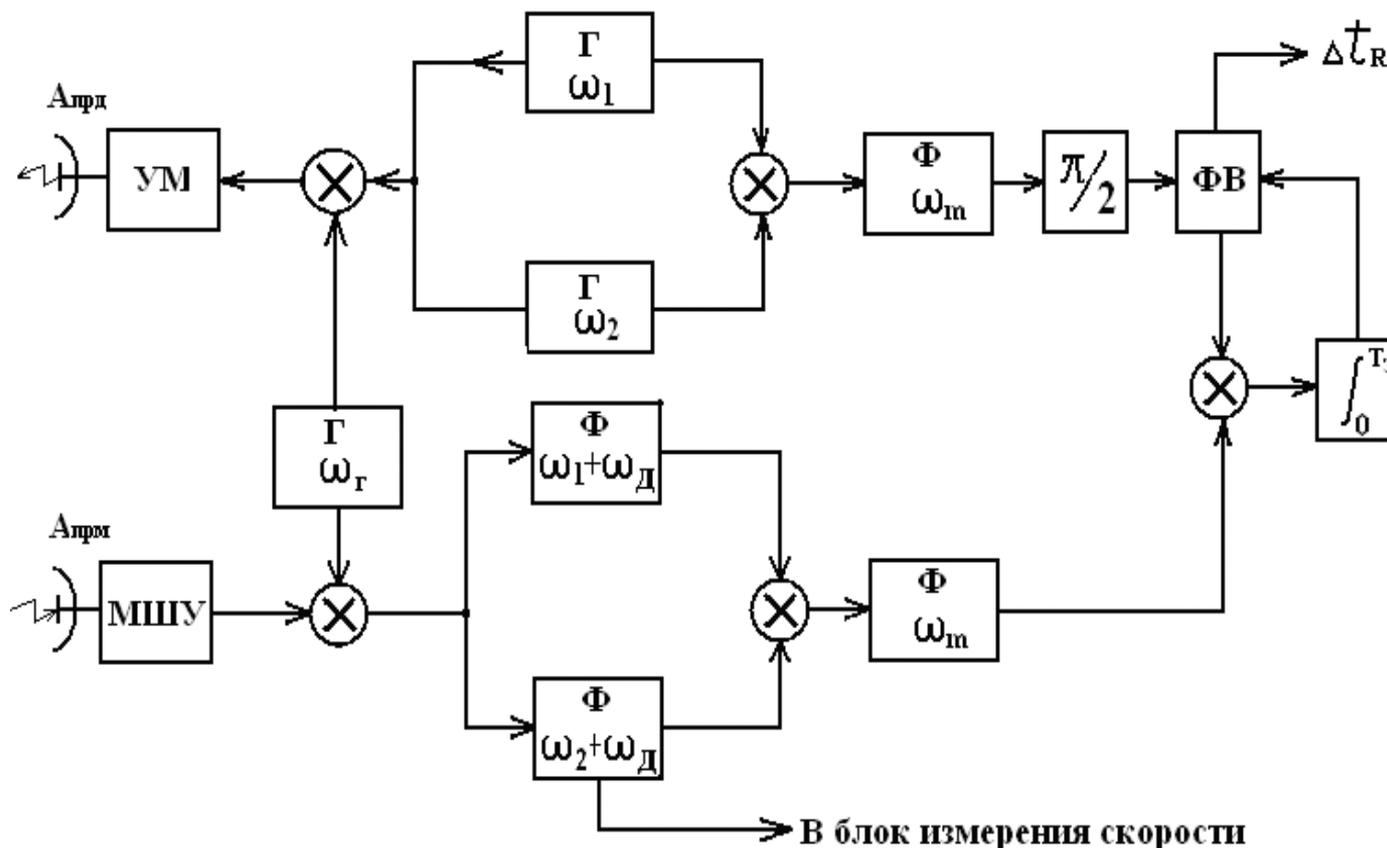


Пример набора масштабных частот

$$F_{M1} = f_2 - f_1 = 137,5 \text{ кГц}; \quad F_{M2} = f_3 - f_2 = 112,5 \text{ кГц}; \quad F_{M3} = f_3 - f_1 = 250 \text{ кГц}$$

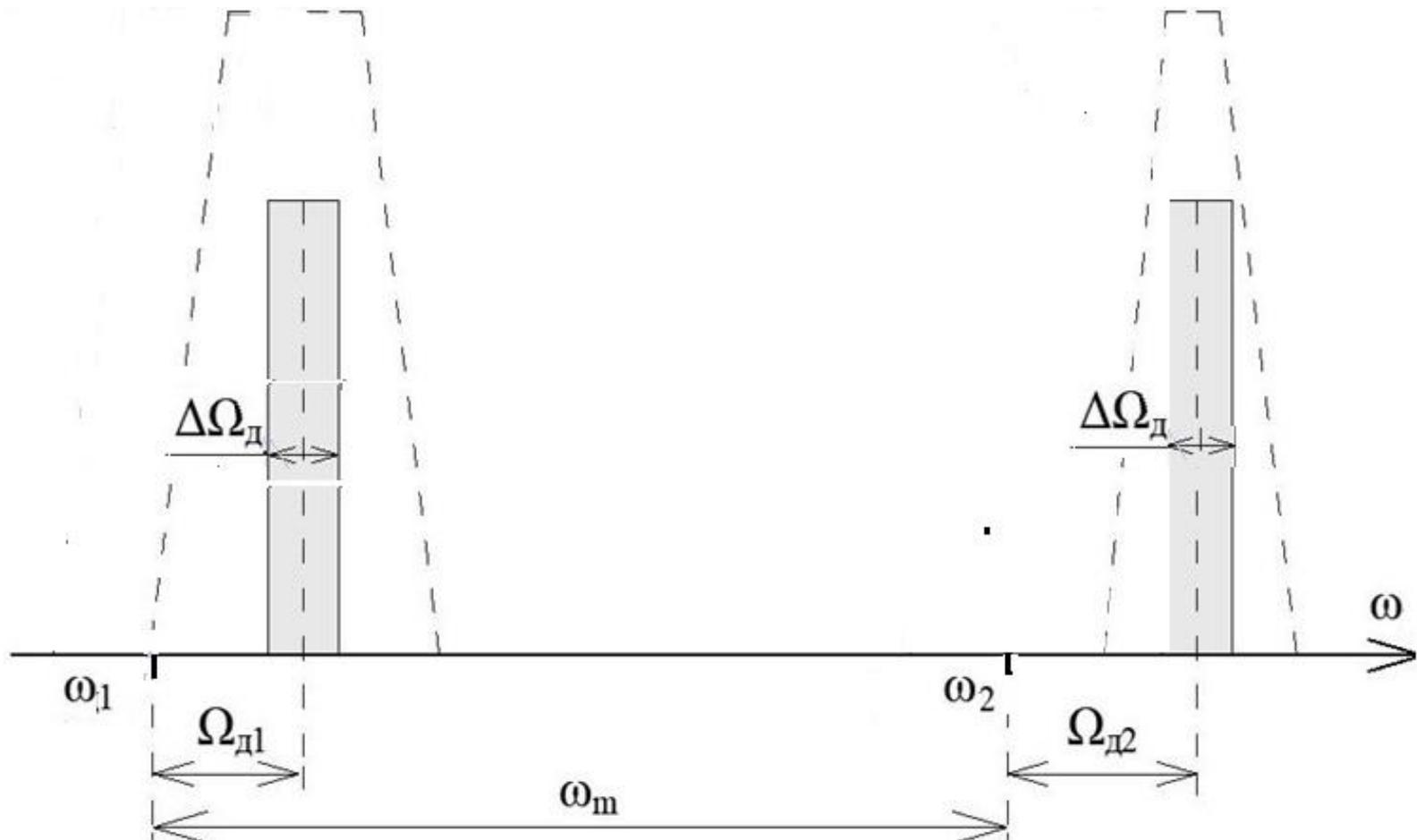
РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

- Блок-схема бортового устройства измерения дальности, высоты и вертикальной скорости посадочного модуля (ПМ) на примере одной шкалы



РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Спектр преобразованного сигнала



РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Методические ошибки

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

Здесь введены следующие обозначения: $\lambda = 0,0068$ м (длина волны),
 $\Theta_3 \approx \Theta_A$, - угловая ширина функции произведения ДНА и ДОР, $T_3 = 0,1$ с – постоянная времени фильтра фазометра, $\mu \ll 1$ – относительный размер цели (пятна ДНА на поверхности) по дальности, Δf_c – ширина доплеровского спектра гармоник эхо-сигнала, μ_w – математическое ожидание скачка ускорения, σ_w – СКО флуктуаций ускорения.

Ошибки смещения и динамические ошибки на порядок меньше флуктуационных

РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Флуктуационные ошибки измерений

Параметр	Расчетные значения						
	0	40	100	160	220	295	300
Время, с	0	40	100	160	220	295	300
Вертикальная скорость, м/с	0	50	10	9,5	9,0	3	1
Высота, м	5000	3600	1900	1200	600	20	1
Дальность, м	5320	3830	2021	1276	639	21	1,06
Полоса допл. частот, Гц	0	154,50	30,9	29,35	27,81	9,27	3,09
σ_v , м/с	0,001	0,188	0,084	0,082	0,080	0,046	0,026
σ_H , м	10,41	0,172	0,203	0,131	0,067	0,0036	0,0022
σ_R , м	11,08	0,183	0,216	0,138	0,071	0,0039	0,0024

Требуемые значения ошибок

По дальности (высоте): $3\sigma_{R(H)} = 0,5 + 0,02R(H)$, м.

По вертикальной скорости: $3\sigma_v < 1\% V$, м/с

РЛС лунного посадочного модуля: ошибки измерений...

Заключение

Выбор типа РЛС посадочного модуля (ПМ), использующей в качестве зондирующего сигнала излучение нескольких гармоник (3-4), обеспечивающих возможность многошкального однозначного измерения дальности (высоты) до поверхности планеты и составляющих вектора скорости, представляется наиболее рациональным по сравнению с другими известными типами. Когерентный характер излучения такой РЛС позволяет измерять значения указанных выше параметров движения ПМ вплоть до нулевых высот, обеспечивая практически потенциальные значения точности измерений. Указанные возможности достигаются за счет использования фазового метода измерения дальности (высоты) и доплеровского метода измерения скорости. Как показывают расчеты, при обеспечении мощности передатчика порядка 75-100 мВт отношение энергии полезного сигнала к спектральной плотности теплового шума на входе детектора, даже на высоте 5000 м составляет более 100, что дает возможность не учитывать влияние шумовой помехи на точность измерений. Аппаратурная реализация РЛС и, в частности, измерителей фазовой задержки гармоник эхо-сигнала и измерителей его доплеровского сдвига относительно зондирующего, представляется несложной, поскольку используемые в них основные узлы являются хорошо отработанными.

**Благодарим за
внимание**