

ДАТЧИК СКОРОСТИ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ

Общие сведения о датчике скорости системы автономной посадки

Для обеспечения автоматизированной посадки ЛА необходимо измерять три составляющие вектора скорости относительно поверхности и наклонную дальность до расчетной точки касания. По результатам этих измерений АСУ формирует команды управления вектором тяги (рис. 1) таким образом, чтобы в момент касания все компоненты скорости были равны нулю [1]. В режиме висения все компоненты скорости должны быть сведены к нулю на заданной высоте по командам АСУ или с помощью ручной системы управления. В типовом случае необходимо измерение положительных и отрицательных значений составляющих V_x , V_y , V_z по осям ЛА в диапазоне нескольких десятков метров в секунду с максимальной погрешностью $0,5 \text{ м/с} \pm 1,5\%$ при допустимом времени усреднения $0,1 \text{ с}$ [3].

При измерении скорости ЛА относительно поверхности применяют РЛС, основанные на использовании эффекта Доплера. В автономных радиолокационных измерителях отражающим объектом является облучаемый участок поверхности, над которым находится ЛА. Пусть с помощью направленной антенны облучается площадка 1 (см. рис. 1). Сигнал на выходе приемной антенны, диаграмма направленности которой совпадает с диаграммой передающей антенны, представляет собой сумму составляющих, отраженных всеми элементами поверхности, лежащими в пределах облучаемой площадки. Поэтому даже если зондирующий сигнал чисто синусоидален, принимаемый сигнал содержит непрерывное множество частотных составляющих («доплеровский спектр»). Ширина доплеровского спектра зависит от диапазона радиальных скоростей элементарных отражателей в пределах облучаемой площадки. Распределение энергии частотных компонент принимаемого сигнала (огibaющие энергетического спектра – «б», «в», «г» на рис. 1) зависит от формы диаграмм направленности антенн (ДН) и диаграммы обратного рассеяния (ДОР) поверхности.

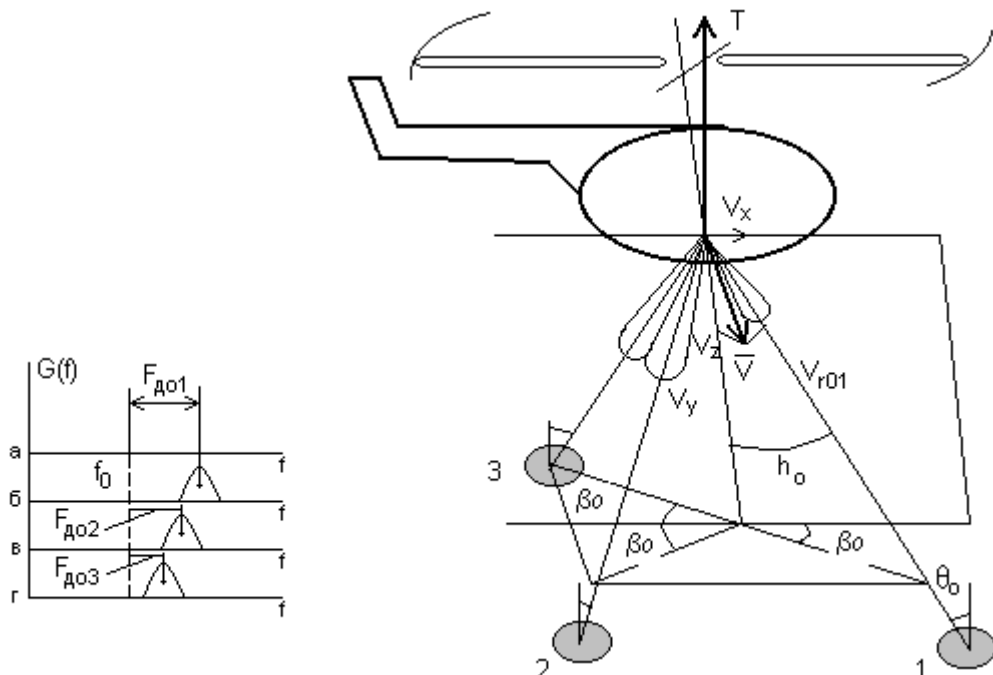


Рис.1. Основные соотношения в доплеровском датчике скорости:
а – спектр зондирующего сигнала; **б, в, г** – спектры сигналов на выходах приёмных антенн по лучам 1, 2, 3.

С точностью до влияния ДОР поверхности (форма которой точно неизвестна) «средняя» частота доплеровского спектра, измеренная, например, по положению его центра тяжести, сдвинута относительно спектральной линии передатчика на величину

$$F_{до} = f_0 \cdot \frac{2}{c} v_{го} = \frac{2}{\lambda_0} |V| \cos \gamma_0 = k \cdot v_{го} \quad (1)$$

где f_0, λ_0 - частота и длина волны передатчика; c – скорость распространения радиоволн; γ_0 – угол между направлением вектора скорости V и направлением максимума (симметричной) диаграммы направленности антенны; V – полный вектор скорости; $v_{го}$ – составляющая V по направлению максимума излучения.

Ширина доплеровского спектра определяется соотношением

$$\Delta f_d = \frac{2}{\lambda_0} |V| \Delta \gamma \sin \gamma_0$$

где $\Delta \gamma$ – ширина ДН антенны в плоскости угла γ_0 .

Поскольку множитель $k = 2f_0/c = 2/\lambda_0$ известен, среднее доплеровское смещение по лучу $F_{до}$, которое можно измерить, может служить аналогом проекции вектора скорости на направление максимума ДН. Определение скорости ЛА сводится к построению вектора по его проекциям на эти направления. Если антенна неподвижна относительно ЛА и направления диаграммы направленности фиксированы, полный вектор скорости V (и любые его составляющие в системе координат ЛА) однозначно определяется по результатам измерения составляющих по трем направлениям, не лежащим в одной плоскости.

Взаимное расположение лучей определяет алгоритм вычисления компонент V_x, V_y, V_z по измеренным значениям частот $F_{до1}, F_{до2}, F_{до3}$. При часто применяемом λ -образном в плане расположения лучей алгоритм вычислителя весьма прост.

В этом случае

$$\begin{aligned} F_{до1} &= (2/\lambda_0) v_{r1} = 2/\lambda_0 (V_x \cos \beta_0 \cdot \sinh_0 - V_y \cosh_0 + V_z \sin \beta_0 \cdot \cosh_0); \\ F_{до2} &= (2/\lambda_0) v_{r2} = 2/\lambda_0 (-V_x \cos \beta_0 \cdot \sinh_0 - V_y \cosh_0 + V_z \sin \beta_0 \cdot \cosh_0); \\ F_{до3} &= (2/\lambda_0) v_{r3} = 2/\lambda_0 (-V_x \cos \beta_0 \cdot \sinh_0 - V_y \cosh_0 - V_z \sin \beta_0 \cdot \cosh_0), \end{aligned} \quad (2)$$

Где v_{r1}, v_{r2}, v_{r3} – радиальные скорости центров облучаемых площадок; β_0, h_0 – углы ориентирования лучей 1, 2, 3 соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскости ЛА (радиальные скорости в направлениях лучей получены как суммы проекций всех составляющих вектора V на направления максимумов излучения).

Решение системы уравнений(2) позволяет определить алгоритм вычисления компонент V_x, V_y, V_z вектора V через измеренные доплеровские смещения $F_{до1}, F_{до2}, F_{до3}$ и известные углы β_0, h_0 :

$$\begin{aligned} V_x &= (F_{до1} - F_{до2}) \lambda_0 / 4 \cdot (1 / (\cos \beta_0 \cdot \sinh_0)) = (F_{до1} - F_{до2}) k_1; \\ V_y &= (-F_{до1} - F_{до3}) \lambda_0 / 4 \cdot (1 / (\cosh_0)) = -(F_{до1} + F_{до3}) k_2; \\ V_z &= (F_{до2} - F_{до3}) \lambda_0 / 4 \cdot (1 / (\sin \beta_0 \cdot \sinh_0)) = (F_{до2} - F_{до3}) k_3; \end{aligned} \quad (3)$$

Ошибка определения компонент вектора скорости V_x, V_y, V_z зависит от ошибки оценивания частот $F_{до1}, F_{до2}, F_{до3}$ погрешности коэффициентов k_1, k_2, k_3 и ошибок вычислений в соответствии с равенствами(3).

В реальных условиях преобладает составляющая ошибки, зависящая от погрешности оценивания частот; при этом аппаратурная погрешность частотомеров может быть сделана практически несущественной (0,05...0,1%) [1] и наибольший вес имеет составляющая, определяемая свойствами сигнала.

Полезная часть сигнала имеет существенную ширину спектра (5...10% от величины средней доплеровской частоты $F_{до}$) и принимается на фоне собственных шумов

измерителя, создаваемых шумами приемного устройства и при непрерывном излучении шумами паразитной модуляции зондирующего сигнала, просачивающегося на вход. Другая особенность принимаемого сигнала – некоторая неопределенность формы огибающей доплеровского спектра, связанная с неопределенностью формы ДОР поверхности.

«Шумоподобность» сигнала вызывает флуктуации на выходе измерителя, а случайная деформация огибающей доплеровского спектра при изменениях вида и состояния отражающей поверхности - медленные изменения отсчета $F_{до}$ («ошибка смещения»).

Дисперсия флуктуационной составляющей погрешности при применении квазиоптимальных следящих частотомеров близка к дисперсии оптимальной оценки средней частоты шумоподобного сигнала на фоне нормального шума с равномерной спектральной плотностью[2]:

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{4\pi^2} \frac{1 + Q \cdot \tau_k}{Q \cdot T_H \cdot \tau_k^2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + Q \cdot \tau_k}} \right)^4 \cdot \left(1 + \frac{1}{2\sqrt{1 + Q \cdot \tau_k}} \right) \quad (4)$$

где $Q = P_c/N_0$ – отношение средней мощности сигнала к спектральной плотности шума; τ_k – время корреляции шумоподобного сигнала; $T_H \approx 1/\Delta f_d$ – время наблюдения. Характерно, что дисперсия оценки средней частоты доплеровского спектра при $Q\tau_k \gg 1$ определяется выражением

$$\sigma_{f \min}^2 \approx \frac{1}{4\pi^2} \frac{f_d}{T_H} \quad (5)$$

Учитывая соотношения

$$\Delta f_d = \frac{2V}{\lambda_0} \Delta\gamma \sin \gamma_0 \quad \text{и} \quad F_{до} = \frac{2V}{\lambda_0} \cos \gamma_0$$

из (5) можно получить выражение минимального достижимого значения относительной величины флуктуирующей составляющей измерения частоты и скорости:

$$\frac{\sigma_f}{F_{до}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{F_{до} T_H}} \sqrt{\frac{\Delta f_d}{F_{до}}} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_v}{V} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \text{tg} \gamma_0 \frac{1}{\sqrt{V T_H}} \frac{\lambda_0}{\sqrt{D_\gamma}} \quad (7)$$

где V – модуль вектора скорости, D_γ – размер апертуры антенны в плоскости угла γ_0 (в формуле (7) принято $\gamma_0 \approx \lambda_0 / D_\gamma$).

Из выражения (7) видно, что малые скорости измеряются с худшей относительной погрешностью.

Относительная величина медленно меняющейся компоненты погрешности («ошибки смещения») определяется соотношением

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta F}{F_{до}} = \frac{\Delta\theta^2}{2\pi} \frac{f'(\theta_0)}{f(\theta_0)} \text{tg} \rho = \frac{1}{2\pi} \frac{f'(\theta_0)}{f(\theta_0)} \text{tg} \rho \frac{\lambda_0^2}{D_\theta^2} \quad (8)$$

где ΔF – смещение центра тяжести доплеровского спектра, вызванное его асимметрией; $f(\theta_0)$ и $f'(\theta_0)$ – значение соответственно ДОР и ее производной в направлении угла падения θ_0 центрального луча антенны; $\Delta\theta$ – ширина ДН антенны в плоскости угла θ_0 ; D_θ – размер

апертуры антенны в плоскости угла θ_0 ; tgr - множитель, зависящий от взаимного ориентирования вектора скорости и направления максимума ДН.

Формулы (7) и (8) определяют предельную точность автономного доплеровского датчика скорости. Обе составляющие погрешности зависят от ширины ДН, т.е. от размеров антенны. При малом допустимом времени усреднения T_n , что характерно для датчиков скорости, включенных в САУ обеспечения автоматизированной посадки, обычно не удается достичь требуемого значения $\sigma_f/F_{до}$ на выходе частотомера при приемлемых размерах антенн [см. (7)]. В этом случае прибегают к комплексированию доплеровского датчика скорости с инерциальным. С точки зрения уменьшения второй существенной компоненты погрешности – «ошибки смещения» (8) комплексирование с нерадиотехническими датчиками неэффективно, так как их погрешности так же, как и ошибка смещения доплеровского датчика, сосредоточены в области «нулевых» частот.

Типовой доплеровский датчик скорости[4].

Основные тактические и технические параметры:

Диапазон измерения составляющих скорости V_x, V_y, V_z	$\pm 150 \text{ м/с}$
Максимальная ($3\sigma_{v_i}$) ошибка измерения	$1,5\% V_i + 0,5 \text{ м/с}$
Постоянная времени следящего измерителя	$\approx 0,1 \text{ с}$
Способ представления выходных данных:	
а) в виде импульсных последовательностей с	$F_{П 1,2,3} = F_{ДО 1,2,3}$ - для БЦВМ АСУ;
б) в виде постоянных напряжений – для стрелочного индикатора	
Высотность	7500 м
Длина волны передатчика	$2,8 \text{ м}$
Тип зондирующего сигнала	гармонический
Мощность передатчика	200 мВт
Ширина лучей антенны	$\approx 5^\circ$
Углы ориентирования лучей	$\beta_0 \approx 45^\circ$ $h_0 \approx 23^\circ$

Функциональная схема доплеровского датчика скорости системы автоматизированной посадки приведена на рис.2. Волноводно-щелевые передающая и приемная антенны А1 и А2 формируют по три луча 1,2,3, расположенные, как показано на рис.1.

Зондирующий сигнал – немодулированный: в качестве передатчика используются твердотельные (варакторные) умножители частоты ВУ1 и ВУ2 задающего кварцевого гетеродина КГ, работающего на частоте 500 кГц. Умножитель частоты ВУ1 питает лучи 1 и 2, а умножитель ВУ2 – луч 3. Частоты зондирующих сигналов отличаются на 500 кГц. Сигналы, принятые с направлений 1, 2 и 3, поступают на смесители СМ1, СМ2, СМ3. В качестве напряжения гетеродина в смесителях СМ1 и СМ2 используется колебание с выхода умножителя ВУ2, а в смесителе СМ3 – с умножителя ВУ1. На выходах смесителей образуются колебания со средними частотами спектров соответственно $500 \text{ кГц} + F_{до 1}$, $500 \text{ кГц} + F_{до 2}$ и $500 \text{ кГц} - F_{до 3}$. Таким образом, разность частот передатчиков является промежуточной частотой для приёмников всех трёх каналов. Усилители промежуточной частоты УПЧ1, УПЧ2 и УПЧ3 идентичны; средняя частота их полосы пропускания равна 500 кГц.

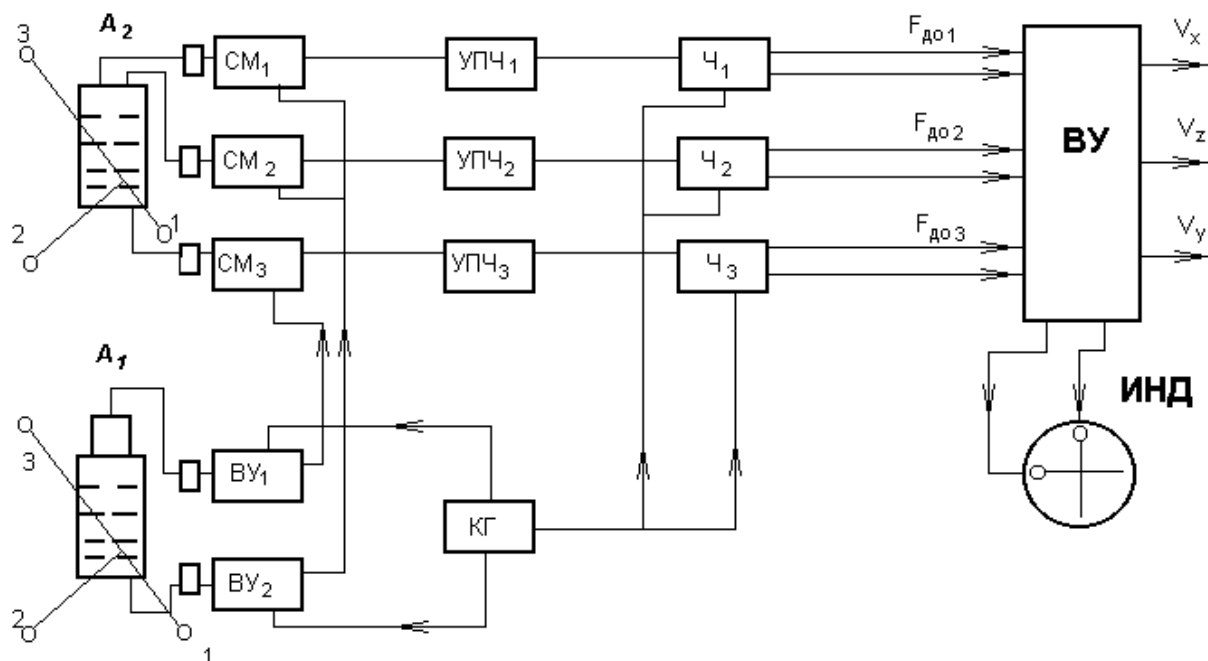


Рис. 2 Функциональная схема доплеровского датчика скорости

Сигналы промежуточной частоты поступают на частотомеры Ч_1 , Ч_2 и Ч_3 ; по результатам оценивания частот $F_{\text{до}1}$, $F_{\text{до}2}$ и $F_{\text{до}3}$ в соответствии с равенствами (3) вычисляются составляющие V_x , V_y , V_z вектора скорости ЛА относительно поверхности, используемые в АСУ. Частотомеры всех трёх каналов идентичны; они выполнены по схеме «следающего фильтра» с дискриминатором на «квадратурных смесителях» [1]. Такие частотомеры по дисперсии оценивания средней частоты спектра близки к оптимальным. Схема с квадратурными смесителями позволяет выявить знак доплеровского смещения, что необходимо для определения направления составляющих скорости V_x , V_y , V_z . Функциональная схема частотомеров приведена на рис. 3.

Сигнал с выхода УПЧ приёмника со средней частотой спектра $500 \text{ кГц} + F_{\text{до}}$ поступает на два смесителя СМ_1 и СМ_2 , на вторые входы которых подается синусоидальное напряжение перестраиваемого гетеродина СлГ. Напряжение гетеродина на входах смесителей отличается по фазе на 90° (отсюда название – «квадратурные смесители»). Если частота F_r перестраиваемого гетеродина близка к величине $500 \text{ кГц} + F_{\text{до}}$, то на выходах фильтров Φ_1 и Φ_2 , полоса которых приблизительно согласована с шириной доплеровского спектра, появятся напряжения, знак разности фаз которых зависит от знака разности частот $\delta F = [(500 \text{ кГц} + F_{\text{до}}) - F_r]$. Эти напряжения подаются на импульсный фазовый детектор ФД, напряжение с выхода которого поступает на схему СУ управления частотой гетеродина СлГ. Фазовый детектор состоит из ограничителей ОГР_1 и ОГР_2 , дифференцирующих цепей D_1 и D_2 и схем совпадения СС_1 и СС_2 . Если положительная полуволна напряжения с выхода ограничителя ОГР_1 совпадает с положительным импульсом на выходе дифференцирующей цепи D_2 при $\delta F > 0$, то при $\delta F < 0$, будет иметь место аналогичное совпадение напряжений с выходов ограничителя ОГР_2 и цепочки D_1 .

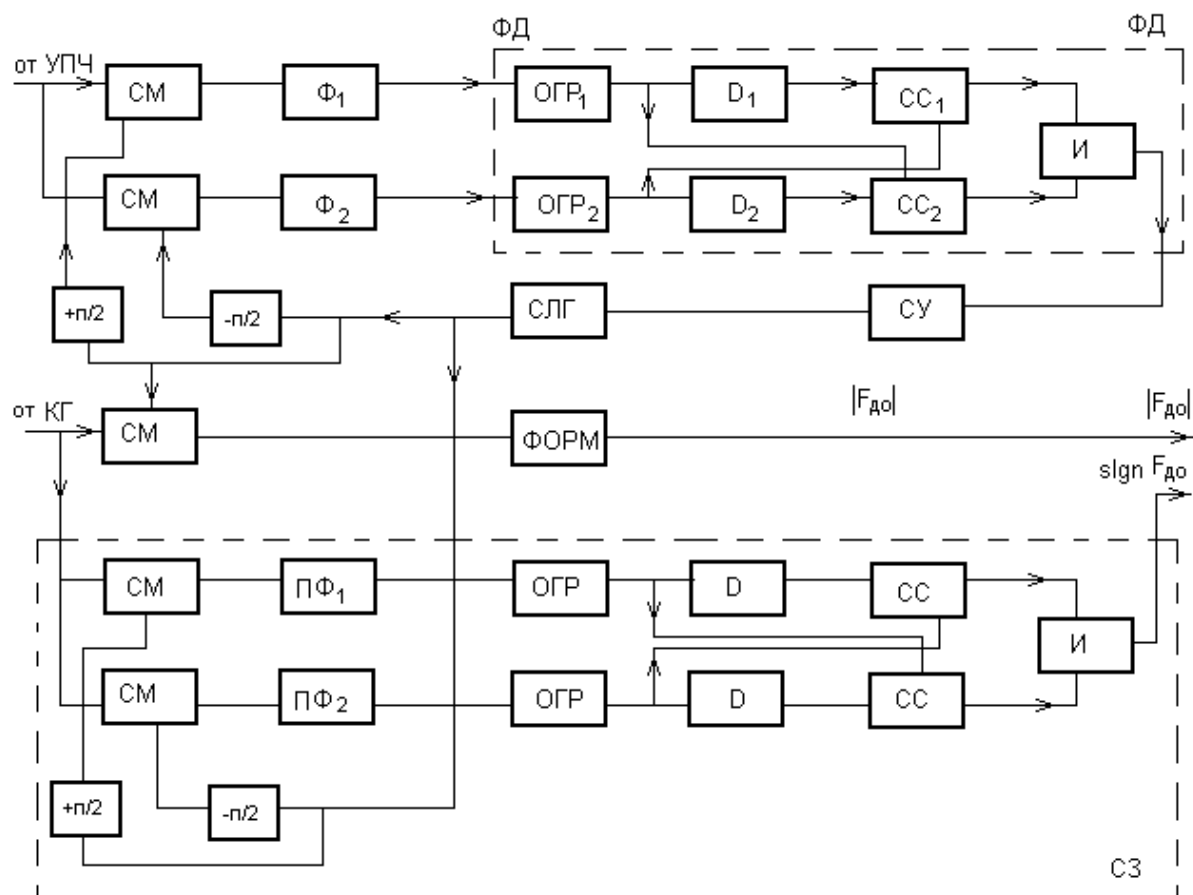


Рис.3 Следящий частотомер

Импульсы с выходов схем совпадения поступают на дифференциальный интегратор *И*, знак приращения напряжения на котором зависит от соотношения средних частот следования импульсов со схем CC_1 и CC_2 . Напряжение дифференциального интегратора управляет частотой перестраиваемого гетеродина *СЛГ* таким образом, что поддерживает ее равной величине $500 \text{ кГц} + F_{до}$. Если частота перестраиваемого гетеродина равна средней частоте спектра сигнала на выходе УПЧ, $(500 \text{ кГц} + F_{до})$ средние частоты следования импульсов на выходах схем совпадения одинаковы и напряжение на выходе дифференциального интегратора равно нулю. Частота синусоидальных колебаний перестраиваемого гетеродина может служить аналогом средней частоты спектра сигнала на выходе УГТЧ.

Для устранения постоянного слагаемого, равного промежуточной частоте (500 кГц), служит смеситель $СМ_3$ (см. рис.3), на который подаются синусоидальные напряжения перестраиваемого гетеродина и задающего генератора с частотой 500 кГц . Из гармонического сигнала на выходе этого смесителя формируются импульсы, частота следования F которых используется в качестве оценки средней частоты доплеровского спектра $F_{до}$. Знак доплеровского смещения определяется с помощью "схемы знака" (СЗ на рис.3). Эта схема аналогична описанному выше дискриминатору с квадратурными смесителями; схема СЗ сравнивает частоту перестраиваемого гетеродина $F_{до} = 500 \text{ кГц} + F_{до}$, с опорным сигналом 500 кГц . Отличие "схемы знака" от дискриминатора следящего фильтра заключается в ширине полосы фильтров $ПФ_1$ и $ПФ_2$, которая выбирается равной максимально возможному значению доплеровского смещения $F_{до}$. Напряжение с

интегратора И схемы знака, полярность которого определяется знаком доплеровского смещения $F_{ДО}$, подается на вычислитель.

Для функционирования следящего измерителя необходимо предварительно настроить перестраиваемый гетеродин таким образом, чтобы сигнал разностной частоты с выходов квадратурных смесителей $СМ_1$ и $СМ_2$ попадал в полосу узкополосных фильтров Φ_1 и Φ_2 . Процесс предварительной подстройки гетеродина осуществляется "схемой поиска" (на рис. 4 схема поиска не изображена).

Импульсные последовательности с выходов всех трех частотомеров, частоты следования которых $F_{П1}$, $F_{П2}$, $F_{П3}$ отображает абсолютные величины средних доплеровских смещений $F_{ДО1}$, $F_{ДО2}$, $F_{ДО3}$, а также "сигналы знаков" доплеровских смещений подаются на вычислитель ВУ (см. рис. 2), алгоритм которого соответствует равенствам (3).

Вычисленные значения V_X , V_Y , V_Z , с учетом их знаков в цифровой форме подаются на САУ автоматизированной посадки. Для возможности осуществления "ручного" управления посадкой величины "горизонтальной" составляющей скорости

$V_r' = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ в "вертикальной" V_y отображаются двумерным стрелочным индикатором ИНД со скрещенными стрелками.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка позволяет исследовать зависимость основной погрешности доплеровских датчиков систем посадки на поверхность с неизвестными свойствами - ошибки смещения - от ширины и формы доплеровского спектра. Функциональная схема установки приведена на рис. 4. Установка состоит из имитатора ИС, одного канала доплеровского датчика скорости ДДС и цифрового частотомера Ч.

Доплеровский спектр имитируется путем фильтрации широкополосного шума, получаемого от генератора $ГШ_1$. Фильтр Φ_1 имеет симметричную характеристику, средняя частота которой определяет среднюю частоту $F_{ДО}$ спектра имитируемого сигнала, а полоса пропускания — ширину доплеровского спектра Δf_d . Ширину полосы фильтра Φ_1 можно измерять.

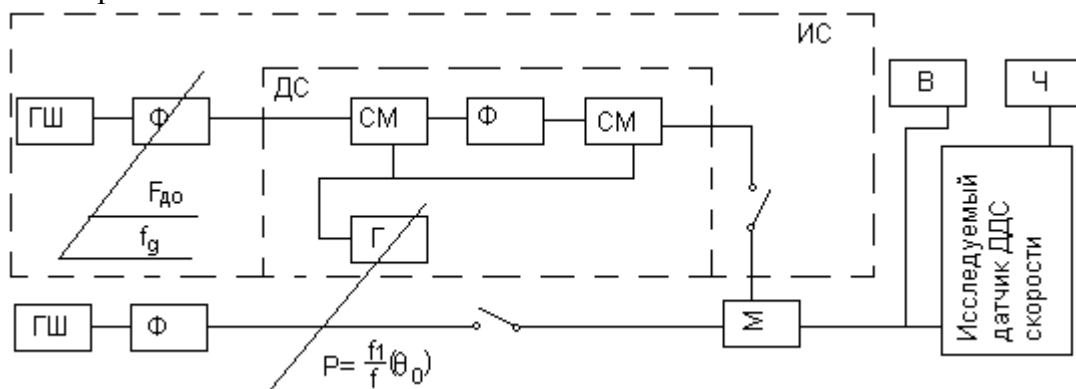


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

Асимметричная деформация спектра сигнала осуществляется с помощью "деформирующей схемы" - ДС, состоящей из широкополосного по сравнению с Φ_1 фильтра Φ_2 , перестраиваемого гетеродина Γ и двух смесителей – $СМ_1$, и $СМ_2$.

Амплитудно-частотная характеристика фильтра Φ_2 в пределах полосы частот фильтра Φ_1 практически линейна. Смеситель CM_1 работает на повышение частоты, а CM_2 - на понижение.

Спектр сигнала на выходе смесителя CM_2 может быть записан в виде

$$G(F) = G_1(F)(1+nF) \quad (9)$$

где $G_1(F)$ - симметричный спектр сигнала на выходе фильтра Φ_1 ; n - коэффициент, характеризующий асимметрию спектра на выходе второго смесителя, величина которого зависит от наклона АЧХ фильтра Φ_2 в окрестности частоты $F_{ДР ДО}$, в которую преобразуется частота $F_{ДО}$ с помощью смесителя CM_1 .

Изменение величины коэффициента n , осуществляемое перестройкой гетеродина G , эквивалентно влиянию изменения наклона ДОР поверхности на форму доплеровского спектра. При постоянных $F_{ДО}$ и Δf_g гетеродин может, быть проградуирован по величине параметра поверхности $p = f'(\theta_0)/f(\theta_0)$, где $f'(\theta_0)$ и $f(\theta_0)$

- значения ДОР и ее производной в направлении $\theta = \theta_0$ (сравните формулу 3).

С помощью генератора шума ГШ₂ и фильтра Φ_3 имитируются собственные шумы на выходе приемного устройства. С выхода сумматора смесь сигнала и шума, мощность которых контролируется с помощью вольтметра эффективных значений V , подается на следящий частотомер исследуемого датчика скорости.

Отсчет скорости производится по стрелочному индикатору и цифровому частотомеру Ч, подключенному к выходу смесителя CM_3 (рис. 4).

Порядок проведения эксперимента

Экспериментально определяется зависимость "ошибки смещения" ΔV от величины параметра поверхности $p = f'(\theta_0)/f(\theta_0)$ при произвольной ширине доплеровского спектра Δf_g . Используя эту зависимость, рассчитывают максимальную ширину ДН антенны $\Delta\theta_{max}$, использование которой при работе над поверхностями с максимальной величиной параметра p , равной p_{max} , обеспечивает максимальное значение относительной величины ошибки смещения, не превышающее $(\Delta V/V)_{max}$

По результатам эксперимента по определению зависимости $\Delta V = \varphi_1(p)$ при произвольном $\Delta f_{д1}$ и заданной величине доплеровского смещения F' рассчитывается зависимость $\Delta V/V = \varphi(p)$.

Используя график функции $\varphi(p)$, определяют относительную величину ошибки смещения $\varphi_{p_{max}}$, имеющую место при ширине доплеровского спектра $\Delta f_{д1}$, использованной в эксперименте, и заданном максимальном значении p_{max} .

Вычисляют максимально допустимую ширину диаграммы направленности антенны, используя формулу

$$\Delta\theta_{max} = \frac{\Delta f_{д1}}{F_{д0} \operatorname{tg} \gamma_0} \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{max} \frac{1}{\varphi(p_{max})}} \text{ рад,}$$

которая следует из (8) и выражения для ширины доплеровского спектра

$$\Delta f_{д} = \Delta\theta \cdot F_{д0} \cdot \operatorname{tg} \gamma_0$$

(диаграмма направленности - осесимметричная).

Содержание отчета

1. Упрощенная функциональная схема и основные тактические и технические данные типового датчика скорости.
2. Функциональная схема экспериментальной установки.
3. Таблицы и график, отображающие результаты эксперимента по определению, зависимости ошибки смещения от параметра поверхности $p=f'(\theta_0)/f(o)$
4. Расчет максимально допустимой ширины диаграммы направленности.
5. Результат эксперимента по определению отношения сигнал/шум, обеспечивающий устойчивое сопровождение сигнала.
6. Краткие выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колчинский В.Е., Мандуровский И.А., Константиновский М.И. Доплеровские устройства и системы навигации. - М.: Советское радио, 1975.
2. Тихонов В.П. Статистическая радиотехника. — М.: Советское радио, 1968.
3. "Aviation Week & Space technology ", 1961 , v.9 , nu 1.
4. Baker David. The LM landing radar. "Space flight"; 1970 , 12, №7 , p . 286 - 289 .