

3. Лабораторные исследования когерентных РЛС с непрерывным излучением

3.1. Лабораторная работа 1

«Исследование одного канала многолучевого доплеровского измерителя путевой скорости летательного аппарата»

Цель работы: исследовать влияние скорости движения, изменений угла тангажа носителя и отношения сигнал/шум на измеряемую величину доплеровской частоты.

3.1.1. Теоретические основы работы доплеровского измерителя скорости и сноса (ДИСС)

Для решения навигационных задач при полете летательных аппаратов в воздушной среде кроме вектора воздушной скорости V необходимо учитывать и вектор скорости ветра U . Результирующий вектор W , определяющий скорость и направление полета называется вектором путевой скорости, а угол φ – углом сноса. Это важные навигационные параметры летательного аппарата.

Доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС) должен непосредственно определять путевую скорость и угол сноса по спектру частот сигнала, отраженного земной поверхностью (рис. 3.1.)

При горизонтальном полете ЛА для обеспечения достаточно большой проекции вектора скорости W на направление облучения и сохранения значительного отражения в направлении антенн ДИСС применяют наклонное облучение земной поверхности (рис.3.1, а).

Для определения спектра частот отраженного сигнала вырежем из облучаемой площади элементарную полоску, все точки которой расположены на направлениях, составляющих угол β_i с вектором скорости W . Имея в виду, что каждой из N элементарных полосок соответствует доплеровский сдвиг частоты $F_{Wi} = \frac{2W}{\lambda} \cos\beta_i$, для всей облучаемой площади спектр отраженного сигнала F можно представить последовательностью частот:

$$F = f_0 + \frac{2W}{\lambda} \cos(\beta_i) \quad (3.1)$$

где f_0, λ – соответственно частота и длина волны излучаемого сигнала.

Если отражающие свойства поверхности в пределах облучаемой площади одинаковы, то форма огибающей спектра определяется формой диаграммы направленности антенны (ДНА) измерителя в вертикальной плоскости. Максимальную спектральную плотность в этом случае (рис.3.2,б) имеет сигнал на средней частоте спектра, соответствующей направлению

β_0 (оси ДНА).

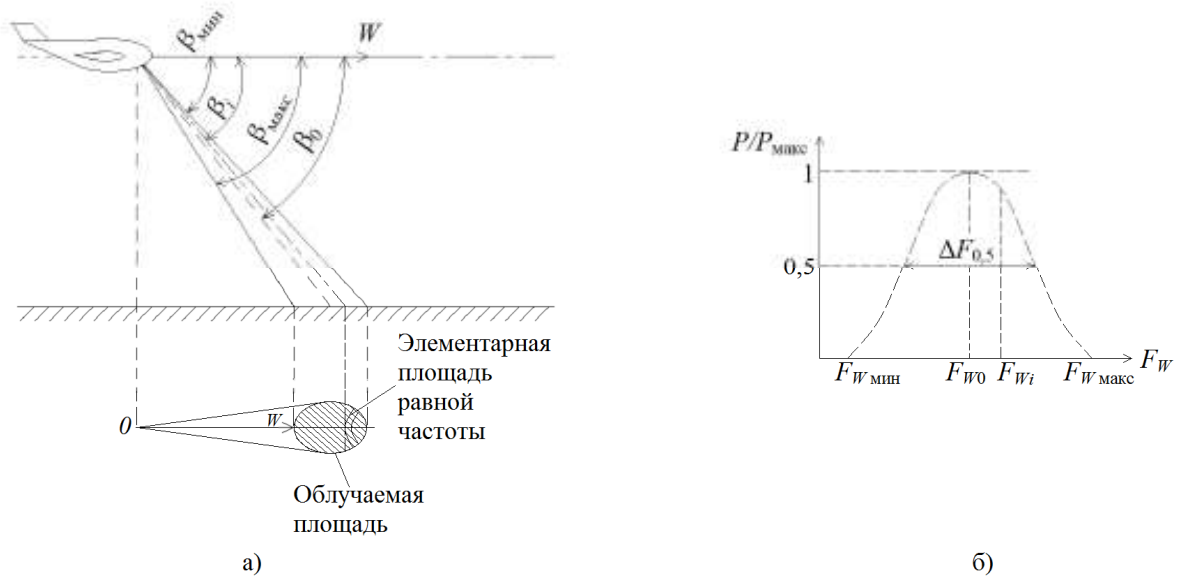


Рис.3.1. Расположение луча (а) и спектр сигнала (б) в однолучевой системе
Ширина спектра сигнала на уровне половинной мощности:

$$\Delta F_{0,5} = \frac{2W}{\lambda} \left[\cos\left(\beta_0 - \frac{\beta_A}{2}\right) - \cos\left(\beta_0 + \frac{\beta_A}{2}\right) \right] = \frac{4W}{\lambda} \sin\beta_0 \sin\frac{\beta_A}{2} \quad (3.2)$$

где β_A - ширина ДНА в вертикальной плоскости.

При достаточно узких ДНА, которые используют в ДИСС, можно принять $\sin(\beta_A / 2) \approx \beta_A / 2$. При этом $\Delta F_{0,5} = 2W\beta_A \sin\beta_0 / \lambda$.

Для измерения путевой скорости ЛА необходимо найти среднюю частоту доплеровского спектра F_{W0} . Если вектор W горизонтален (рис.3.3.) и составляет с осью ДНА угол γ в горизонтальной и β_0 в вертикальной плоскостях, то:

$$\Delta F_{W0} = \frac{2W}{\lambda} \cos(\beta_0) \cos(\gamma_0) \quad (3.3)$$

При совмещении направления облучения в горизонтальной плоскости с вектором угол $\gamma = 0$ и приращение частоты достигает максимума:

$$\Delta F_{Wm} = \frac{2W}{\lambda} \cos(\beta_0) \quad (3.4)$$

При известных λ и β_0 путевую скорость W можно определить непосредственным измерением F_{Wm} с помощью частотомера.

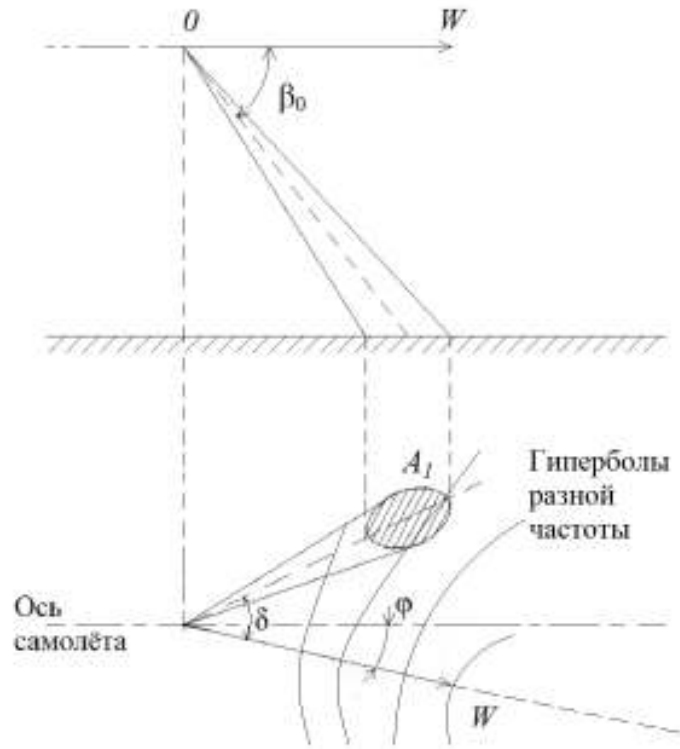


Рис. 3.2. Однолучевая схема расположения луча

Угол сноса φ равен углу, между осью самолета и направлением вектора путевой скорости, т. е. при $F_W = F_{Wm}$.

Для выяснения влияния погрешности определения частоты F_{Wm} на точность измерения угла сноса φ предположим, что в момент измерения F_{Wm} угол $\gamma = 0$ и при этом реальное доплеровское смещение отличается от F_{Wm} :

$$\begin{aligned} \Delta F_W &= F_{Wm} - \hat{F}_W = \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 - \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 \cos \gamma = \\ &= \frac{2W}{\lambda} \cos \beta_0 (1 - \cos \gamma) = F_{Wm} \cdot 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \approx F_{Wm} \frac{\gamma^2}{2}. \end{aligned}$$

Отсюда можно найти погрешность измерения угла сноса φ , вызванную неточностью совмещения оси ДНА с вектором W из-за погрешности определения F_{Wm} :

$$\Delta \varphi = \gamma \approx \sqrt{\frac{2 \Delta F_W}{F_{Wm}}}. \quad (3.5)$$

При $\frac{\Delta F_W}{F_{Wm}} = 0,01$ погрешность измерения φ составляет $\Delta \varphi = 0,14$ рад, или примерно 8° . Такие большие погрешности однолучевого измерителя

при измерении угла сноса являются следствием его низкой чувствительности к изменению угла γ при небольших рассогласованиях направлений W и оси ДНА в горизонтальной плоскости.

Погрешность измерения F_{Wm} вызывает и соответствующую погрешность измерения путевой скорости, значение которой может быть найдено из выражения (3.4);

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta F_{Wm}}{F_{Wm}}.$$

Второй важной причиной погрешностей однолучевых измерителей является крен ЛА. Предположим, что из-за крена истинное значение угла β_0 отличается от расчетного на $\Delta\beta_0$. Продифференцировав выражение (2.4) по параметру β_0 получим:

$$\frac{dF_{Wm}}{d\beta_0} = -\frac{2W}{\lambda} \sin\beta_0.$$

При конечных приращениях запишем:

$$\Delta F_{Wm} = -\frac{2W}{\lambda} \sin\beta_0 \Delta\beta_0. \quad (3.6)$$

Отсюда с учетом (3.4) следует:

$$\left| \frac{\Delta W}{W} \right| = \left| \frac{\Delta F_{Wm}}{F_{Wm}} \right| = \frac{\sin(\beta_0)}{\cos(\beta_0)} \Delta\beta_0 = \Delta\beta_0 \operatorname{tg}(\beta_0).$$

В реальных системах угол облучения β_0 выбирается около 70° . В этом случае относительная погрешность определения путевой скорости составляет 0,05% на каждый градус погрешности $\Delta\beta_0$ в значении истинного угла облучения β_0 .

Уменьшения погрешности, вызываемой креном, можно достигнуть путем стабилизации антенны в горизонтальной плоскости или введения поправок на крен в вычислительном устройстве при обработке данных. Однако это приводит к существенному усложнению измерителя, но не устраняет органических недостатков однолучевого метода. Поэтому однолучевая система не находит практического применения в качестве ДИСС из-за низкой точности измерения как W так и φ . Для измерения собственной скорости и угла сноса летательных аппаратов практическое применение нашли только многолучевые ДИСС. Однолучевые доплеровские измерители применяются, например, дорожно-патрульными службами для измерения скорости движения транспортных средств.

3.1.2. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки приведена на рис. 3.3.

Радиолокационная станция (РЛС) 2 (рис.3.3.), наклоненная к имитатору движения 1 объекта («движущееся окно»), через переходную коробку 4 соединена с контрольно-измерительными приборами 5, 6, 7 и генератором шума 3. Для имитации движения летательного аппарата, на котором установлена ДИСС, использован вращающийся диск с диаметром $D = 310$ мм. Поскольку ширина диаграммы направленности используемой РЛС порядка 20 градусов, а у реальных ДИСС диаграммы имеют ширину 4 - 7 градусов, то для имитации такой ДНА использован принцип «движущегося окна», то есть отражающая движущаяся поверхность закрыта не радиопрозрачным материалом, в котором вырезано окно длиной $r = 4$ см. Это окно и является отражающим объектом для РЛС. Размер окна r , превышение антенны над уровнем «движущегося окна» H , ширина ДНА в вертикальной плоскости φ и угол наклона антенны β_0 связаны приближенным соотношением

$$r = H \varphi \frac{1}{\sin^2(\beta_0)},$$

которое легко получить из геометрических построений.

Оно моделирует, например, при высоте полета 10 км, угле наклона $\beta_0 = 50^\circ$, ширине диаграммы антенны $\Delta\beta = 5^\circ$ протяженность отражающего участка земной поверхности длиной 1.5 км.. Для имитации изменения угла наклона β_0 антенны к вектору W путевой скорости в вертикальной плоскости достаточно изменять расстояние R между центром «движущегося окна» и антенной РЛС при постоянной высоте H подвеса РЛС над уровнем окна.

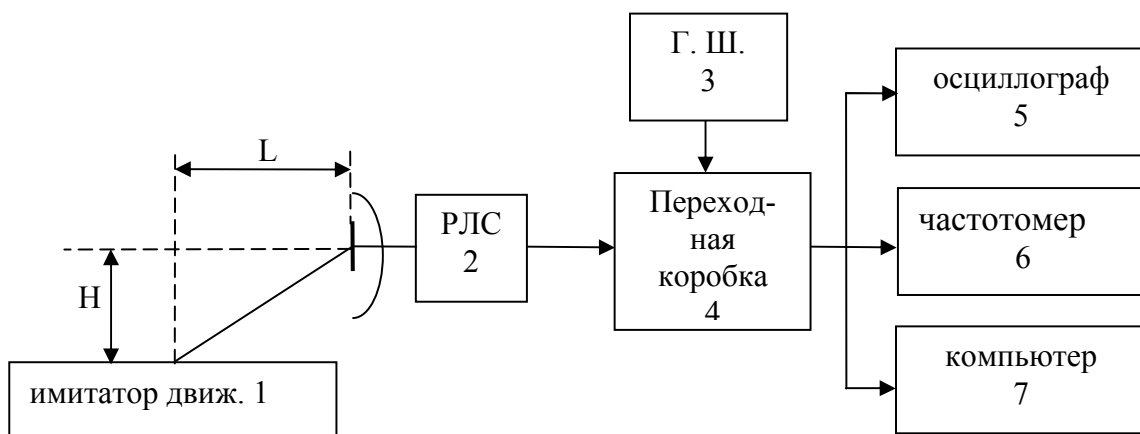


Рис. 3.3. Структура лабораторной установки

Для имитации требуемого отношения сигнал/шум служит генератор шума 3 рис.3.3. , напряжение с которого поступает на переходную коробку,

где суммируется с доплеровским сигналом, поступающим от РЛС. Для наблюдения осциллограмм в различных точках лабораторной установки используется осциллограф 5. Измерение доплеровской частоты осуществляется 2 способами – стандартным цифровым частотомером 6 и по максимуму спектральной плотности доплеровского сигнала, выводимой на монитор компьютера 7, в котором установлена программа с быстрым преобразованием Фурье в среде *MATLAB*.

3.1.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить РЛС согласно инструкции по эксплуатации. Включить имитатор движения «движущееся окно». Проверить подключение контрольно - измерительных приборов к переходной коробке РЛС, включить компьютер 7 и контрольно – измерительную аппаратуру 5 и 6.

2. Исследовать влияние наклона луча ДИСС в вертикальной плоскости на величину доплеровской частоты, для этого:

2.1. При фиксированной высоте H антенны РЛС над «движущимся окном» имитатора движения установить расстояние между «движущимся окном» и антенной РЛС равным R , при этом эквивалентный угол наклона антенны β_0 будет равен: $\beta_0 = \arcsin(H/R)$.

Получить осциллограмму доплеровского сигнала на осциллографе 5. Поворачивая РЛС в вертикальной плоскости добиться максимальной амплитуды доплеровского сигнала. Записать показания частотомера $F_{ДС}$ и угол β_0 в таблицу 3.1. Получить на компьютере в среде *MATLAB* спектр доплеровского сигнала. Записать в таблицу 3.1 частоту $F_{ДК}$ составляющей спектра с максимальной спектральной плотностью.

Таблица 3.1.

R (см)								$H = \dots$ (см)
β_0 (град)	5	10	15	20	25	30	35	
$F_{ДС}$ (Гц)								
$F_{ДК}$ (Гц)								

Примечание: результат измерения доплеровской частоты $F_{ДС}$ методом «счета нулей» считывается с цифрового частотомера 6, а $F_{ДК}$ опреде-

ляемая по максимальной спектральной плотности сигнала, получаемой с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) посредством программы в среде *MATLAB*, считывается с монитора компьютера 7 (рис.3.3) (инструкция прилагается).

2.2. Повторить выполнение пункта 2.1 для всех значений β_0 , приведенных в таб. 3.1.

2.3. Сформулировать выводы по п. 2 и записать в отчет.

3. Определить влияние скорости носителя W на величину доплеровской частоты F_D .

Измерения выполнить при заданных преподавателем одинаковых значениях β_0 , для 5 значений скорости “движущегося окна”.

3.1. Установить напряжение $U_D(B)$ на электродвигателе движущегося окна равным 20 делений индикатора напряжения, измерить цифровым фототахометром скорость вращения диска (инструкция фототахометра прилагается), записать значения скорости вращения диска n [об/мин] и величины измеренных значений $F_{ДС}$ и $F_{ДК}$ доплеровской частоты F_D . Повторить измерения при всех значениях $U_D(B)$, заданных в таблице 2.

3.2. Рассчитать значения линейной скорости движущегося окна W по формуле $W = \frac{n\pi R}{30}$ [м/сек] для каждого измеренного значения n [об/мин] скорости вращения диска

3.4. Сформулировать выводы по п. 3.

Таблица 3.2.

U_D делений	20	30	40	50	60	$\beta_0 =$
n [об/мин]						
W м/сек						
$F_{ДС}$ (кГц)						
$F_{ДК}$ (кГц)						

4. Исследовать влияние величины отношения сигнал/шум на результаты измерения доплеровской частоты (скорости движения) методами «счета нулей» – $F_{ДС}$ и по максимальному значению спектральной плотности доплеровского сигнала $F_{ДК}$, определяемой с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) посредством программы в среде *MATLAB*.

4.1. Установить заданные преподавателем значения β_0 и W , измерить величину напряжения U_C сигнала доплеровской частоты на контрольной точке КТЗ переходной коробки 4, а также произвести измерения доплеровской частоты методом «счета нулей» – $F_{ДС}$ и быстрого преобразования

Фурье (БПФ) $F_{ДК}$ – посредством программы, установленной в среде *MATLAB*.

Результаты занести в табл. 3.3, в первую графу (для $a \geq 100$).

Таблица 3.3.

$U_{ш}, В$								$\beta_0 =$ $W =$ $U_C =$
$a =$	>100	30	20	10	5	3	1	
$F_{ДС} (Гц)$								
$F_{ДК} (Гц)$								

4.2. Включить генератор шума и не меняя установленных значения β_0 и W выставить значения $U_{ш}$, необходимые для получения требуемого отношения сигнал/шум $a = \frac{U_C}{U_{ш}}$ согласно таблице 3.3. Произвести измерения

$F_{ДС}$ и $F_{ДК}$, записать результаты в таблицу 3.3.

4.3. На основании таблицы 3 построить графические зависимости.

4.4. Сформулировать выводы по п. 4 и записать в отчет.

3.2. Лабораторная работа 2.

«Исследование доплеровского пеленгатора движущейся цели»

Цель работы: исследовать амплитудный метод пеленгации по доплеровскому сигналу движущейся цели и влияние отношения сигнал/шум на точность пеленгации.

3.2.1 Теоретические основы методов пеленгации целей

Амплитудные методы пеленгации основаны на использовании направленных свойств антенн. Среди амплитудных методов пеленгации различают методы максимума, минимума и сравнения. Пеленгационная чувствительность - это способность радиопеленгатора изменять напряжение на выходе при изменении положения ДН антенны относительно направления на объект. Чем больше изменение напряжения при заданном изменении угла, тем выше пеленгационная чувствительность. Количественной мерой пеленгационной чувствительности является крутизна пеленгационной характеристики: