

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ РТС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ПУТЕВОЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе

по дисциплине «Системы радионавигации»

для студентов специальности «Радиоэлектронные системы»

всех форм обучения

Минск 2003

УДК 621.396.98 (075.8)

Составитель
В.Г. Устименко

Исследование доплеровской РТС для измерения путевой скорости и угла сноса: Метод. указания к лаб. работе по дисциплине «Системы радионавигации» для студ. спец. «Радиоэлектронные системы» всех форм обучения /Сост. В.Г. Устименко. – Мн.: БГУИР, 2003. – 18 с.: ил.

Методические указания предназначены для практического освоения раздела «Радиоизмерители скорости летательных аппаратов» курса «Системы радионавигации». Изучаются принцип действия и построение доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС) летательного аппарата с частотной модуляцией на основе лабораторной установки, реализующей принцип действия многолучевого ДИСС со следящим измерителем средней частоты доплеровского спектра.

Приводятся краткие теоретические сведения о физических основах метода измерения путевой скорости и угла сноса с использованием эффекта Доплера.

УДК 621.396.98 (075.8)
ББК 32.95 я 73

© Устименко В.Г., составление, 2003
© БГУИР, 2003

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ
 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПУТЕВОЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА
 - 2.1. СТРУКТУРА ДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКТРА
 - 2.2. ИЗМЕРИТЕЛИ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ (ИСЧ) ДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКТРА
 - 2.3. РЕЖИМ «ПАМЯТЬ» В ДИСС
 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ
 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ
 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА
 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
- ЛИТЕРАТУРА

Библиотека БГУИР

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В настоящей лабораторной работе студенты должны изучить:

- 1) физические основы доплеровского измерения путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов;
- 2) способы измерения средней частоты доплеровского спектра;
- 3) структурную схему ДИСС со следящим измерителем средней частоты доплеровского спектра;
- 4) функциональную схему лабораторной установки.

После проведения эксперимента необходимо выполнить заданные расчеты, оценить погрешность измерений параметров следящим измерителем. Сделать выводы по работе.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПУТЕВОЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА

Радиальную скорость V_r цели или летательного аппарата с помощью радиотехнической системы (РТС) можно измерить двумя способами: используя эффект Доплера на несущей частоте или с помощью выражения $V_r = dR / dt$ (где R – расстояние между измерительной системой и целью), т.е. V_r определяется дифференцированием показаний радиодальномера либо оценкой конечной разности дальностей на границах фиксированного интервала времени. Обычно используется первый способ, имеющий более высокую точность измерения.

Разность частот излученного и принятого колебаний называют доплеровским приращением частоты f_{∂} , и для запросно-ответного или радиолокационного канала (не связного) $f_{\partial} = 2V_r(t) / \lambda$, где $V_r(t)$ – радиальная составляющая скорости; λ – длина волны излучаемых колебаний. В практических расчетах удобнее использовать выражение

$$f_{\partial} = 200(V(t) / \lambda) \cos \theta(t),$$

где f_{∂} выражается в герцах, скорость – в метрах в секунду, длина волны – в сантиметрах; $\theta(t)$ – угол между направлением излучения и вектором скорости $V(t)$.

Путевой скоростью V летательного аппарата (ЛА) называют его горизонтальную составляющую из скорости движения ЛА относительно воздушной среды V_B и скорости движения воздушной среды относительно Земли – скорости ветра U .

На рис.1 перечисленные векторы скоростей образуют так называемый навигационный треугольник, а угол α получил название угла сноса.

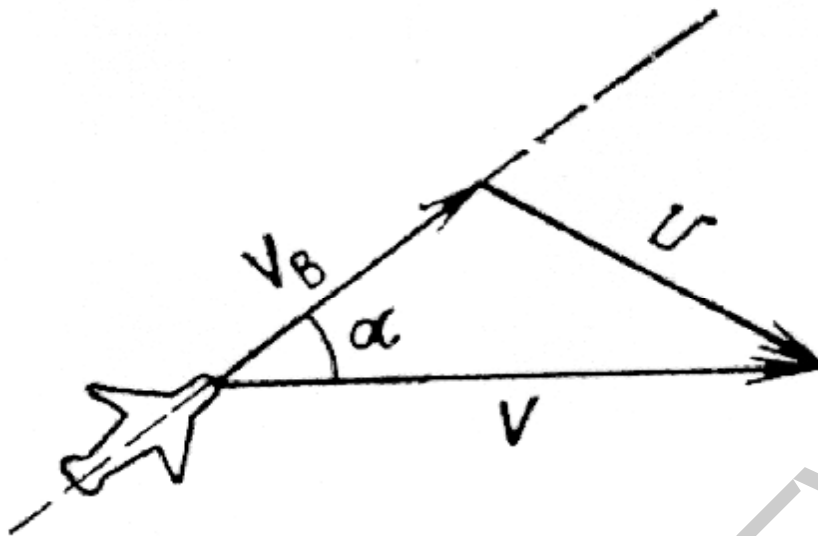


Рис. 1

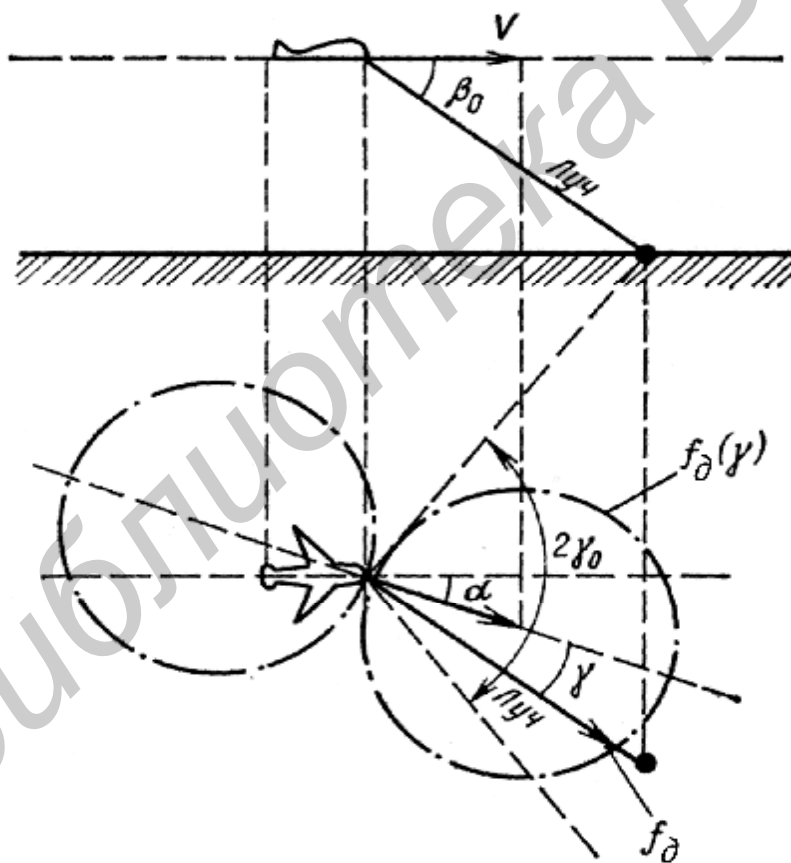


Рис. 2

Измерению обычно подвергаются модуль вектора путевой скорости и угол сноса, однозначно определяющие величину и направление V в связанной системе координат ЛА.

Для первоначального определения возьмем однолучевой ДИСС и введем ряд идеализаций: полет ЛА – строго горизонтальный, скорость – постоянная, а радиолуч ДИСС – бесконечно тонкий, игольчатый. Геометрические соотношения в вертикальной и горизонтальной плоскостях показаны на рис. 2, где β_0 - угол отклонения луча ДИСС в вертикальной плоскости от продольной оси ЛА, а $\gamma + \alpha$ - в горизонтальной (может изменяться в пределах $2\gamma_0$).

Доплеровское приращение частоты f_{∂} определяется проекцией вектора скорости V на радиолуч: $f_{\partial} = (2V / \lambda) \cos \beta_0 \cos \gamma$ - косинусная полярная диаграмма на рис. 2. При $\gamma = 0$, т.е. при совмещении горизонтальной проекции луча с вектором скорости на выходе бортового приемника, получим максимальное значение f_{∂} , а $V = f_{\partial} \lambda / 2 \cos \beta_0$. Угол сноса α измеряется как угол между осью ЛА и осью антенны.

Система однолучевого ДИСС имеет следующие характерные недостатки:

- в районе $f_{\partial \max}$ годограф $f_{\partial}(\gamma)$ имеет самую малую крутизну $\alpha f_{\partial} / \alpha \gamma$, что приводит к низкой точности совмещения оси антенны с направлением вектора скорости и соответственно к грубому определению угла сноса α ;
- наличие угла тангажа ЛА $\pm \Delta \beta$ вносит большую погрешность в измерение скорости;
- требуется высокая кратковременная стабильность f_0 частоты передатчика ДИСС:

$$\frac{\delta f_0}{f_0} \ll \frac{\delta f_{\partial}}{f_0} = \frac{2\delta V}{C} \approx \frac{2 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 10^8} \approx 10^{-9}.$$

Для устранения перечисленных недостатков используют многолучевые ДИСС (рис. 3). На самолетах и космических аппаратах используются X- и Y-образные конфигурации, T-образная – на вертолетах.

В трехлучевом ДИСС доплеровские частоты по направлениям лучей антенны будут следующими:

$$\begin{aligned}
f_{01} &= \frac{2}{\lambda_0} (V_x \cos\beta \cos\gamma - V_z \cos\beta \sin\gamma - V_y \sin\beta); \\
f_{02} &= \frac{2}{\lambda_0} (V_x \cos\beta \cos\gamma + V_z \cos\beta \sin\gamma - V_y \sin\beta); \\
f_{03} &= \frac{2}{\lambda_0} (V_x \cos\beta \cos\gamma + V_z \cos\beta \sin\gamma + V_y \sin\beta).
\end{aligned}
\tag{1}$$

Здесь V_x, V_y, V_z – соответственно продольная, вертикальная и поперечная составляющие скорости ЛА. Следовательно, из (1) получим :

$$\begin{aligned}
V_x &= \frac{|f_{01}| + |f_{03}|}{4 \cos\beta \cos\gamma} \lambda_0, \\
V_z &= \frac{|f_{02}| - |f_{01}|}{4 \sin\gamma \cos\beta} \lambda_0, \\
V_y &= \frac{|f_{01}| + |f_{03}|}{4 \sin\beta} \lambda_0.
\end{aligned}$$

Из приведенных соотношений видно, что при изменении продольной составляющей V_x скорости ЛА (сложение сигналов переднего и заднего лучей) компенсируется вертикальная составляющая, это приводит к уменьшению погрешности измерения с 5% f_0 (в однолучевом ДИСС) до 0,02% f_0 на каждый градус крена ЛА. Кроме того, в многолучевом ДИСС выделяется частота биений между сигналами лучей антиподов, т.е. важна стабильность частоты передатчика за время разности хода лучей, а при отсутствии крена требования к кратковременной стабильности частоты передатчика вообще не предъявляются.

2.1. Структура доплеровского спектра

Ширина луча антенны ДИСС имеет конечные размеры, а характер отражения от земной поверхности является случайным, следовательно, информация, содержащаяся в отраженных сигналах, выделяется не в виде одной частоты $f_{\partial 0}$, а в виде спектра с шириной $\Delta F_{\partial} \approx (2V / \lambda) \sin\beta_0 \Delta\beta_{0,5}$, где $\Delta\beta_{0,5}$ - ширина двухсторонней (на передачу и прием) диаграммы направленности антенны ДИСС на уровне половинной мощности.

Огибающая доплеровского спектра воспроизводит огибающую двусторонней диаграммы направленности антенны ДИСС, а так как доплеровский спектр формируется в результате суммирования сигналов от большого количества независимых случайных отражателей, он является случайным с нормальным законом распределения (рис.4). Его центральная частота

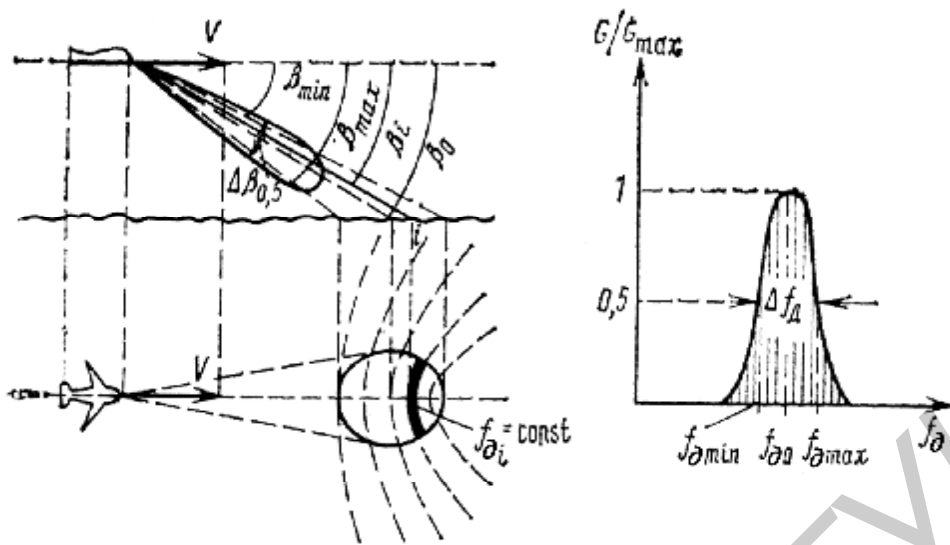


Рис.4

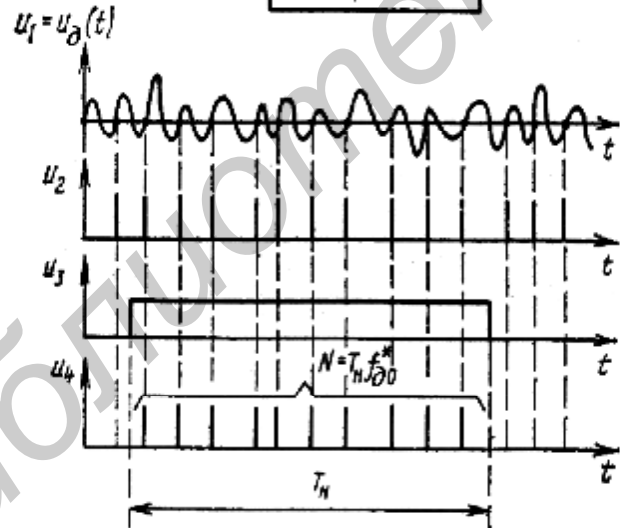
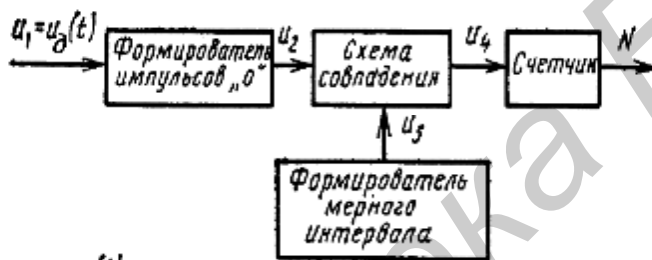


Рис.5

$f_{\partial 0} = (2V/\lambda) \cos \beta_0$, следовательно, относительная ширина доплеровского спектра $\Delta f_{\partial} / f_{\partial 0} = \Delta \beta_{0,5} \operatorname{tg} \beta_0$,

и для типовых значений $\beta_0 \approx 70^0$ и $\beta_{0,5} \approx 4...5$; $\Delta f_{\partial} / f_{\partial 0} \leq 0,1...0,15$ – доплеровский спектр узкополосен.

Измерение путевой скорости сводится к измерению средней частоты сформированного на выходе приемника ДИСС узкополосного доплеровского спектра.

2.2. Измерители средней частоты (ИСЧ) доплеровского спектра

По способу измерения средней частоты доплеровского спектра на выходе приемника ДИСС ИСЧ делят на две основные группы: широкополосные и следящие.

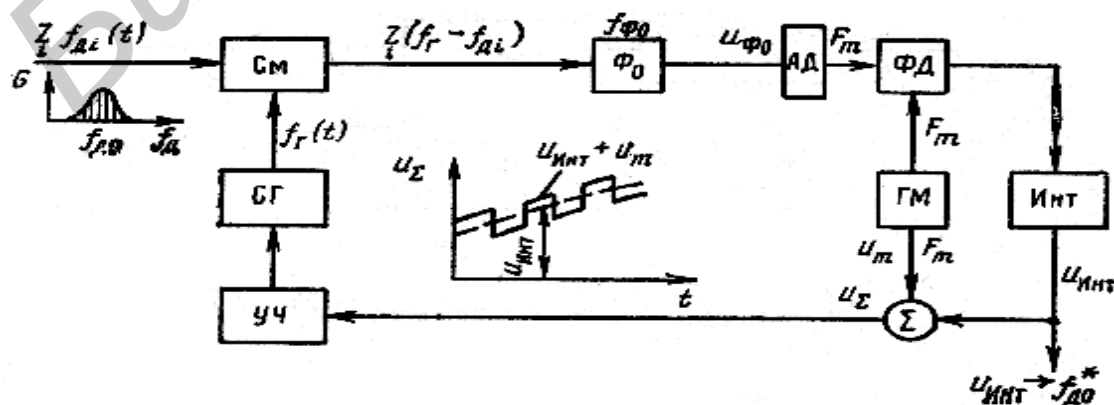
Типичным широкополосным ИСЧ является частотомер-счетчик, который подсчитывает число пересечений нуля напряжением доплеровского сигнала $U_{\partial}(t)$ на мерном интервале усреднения T_H .

Структурная схема устройства и сигналы в ее характерных точках показаны на рис. 5. Формирователь импульсов «0» формирует стандартные импульсы при прохождении $U_{\partial}(t)$ снизу вверх через нулевое значение. Схема совпадения пропускает на счетчик только те импульсы, которые совпадают по времени с мерным импульсом, поступающим с формирователя мерного интервала. Подсчитанное счетчиком число импульсов N пропорционально оценке средней доплеровской частоты, которая тем ближе к истинному значению, чем больше период усреднения и чем меньше относительная ширина доплеровского спектра $\Delta f_{\partial} / f_{\partial 0}$.

Известны также аналоговые варианты ИСЧ и схемы, построенные по принципу периодомера. Все эти схемы должны быть широкополосны, их полоса пропускания должна охватывать весь диапазон возможных значений $f_{\partial 0}$, так как они решают задачу во временной области. Всякий счетчик нулей определяет не среднее, а среднеквадратическое значение доплеровской частоты. Эти величины достаточно близки для типового узкополосного доплеровского спектра, однако в тех задачах, где ширина доплеровского спектра соизмерима с его средней частотой, оценка $f_{\partial 0}$ будет завышена и с этим следует считаться.

Следящий ИСЧ решает задачу оценки $f_{\partial 0}$ в частотной области с использованием контура автоподстройки следящего гетеродина. Структурная схема его представлена на рис. 6.

Рис.6



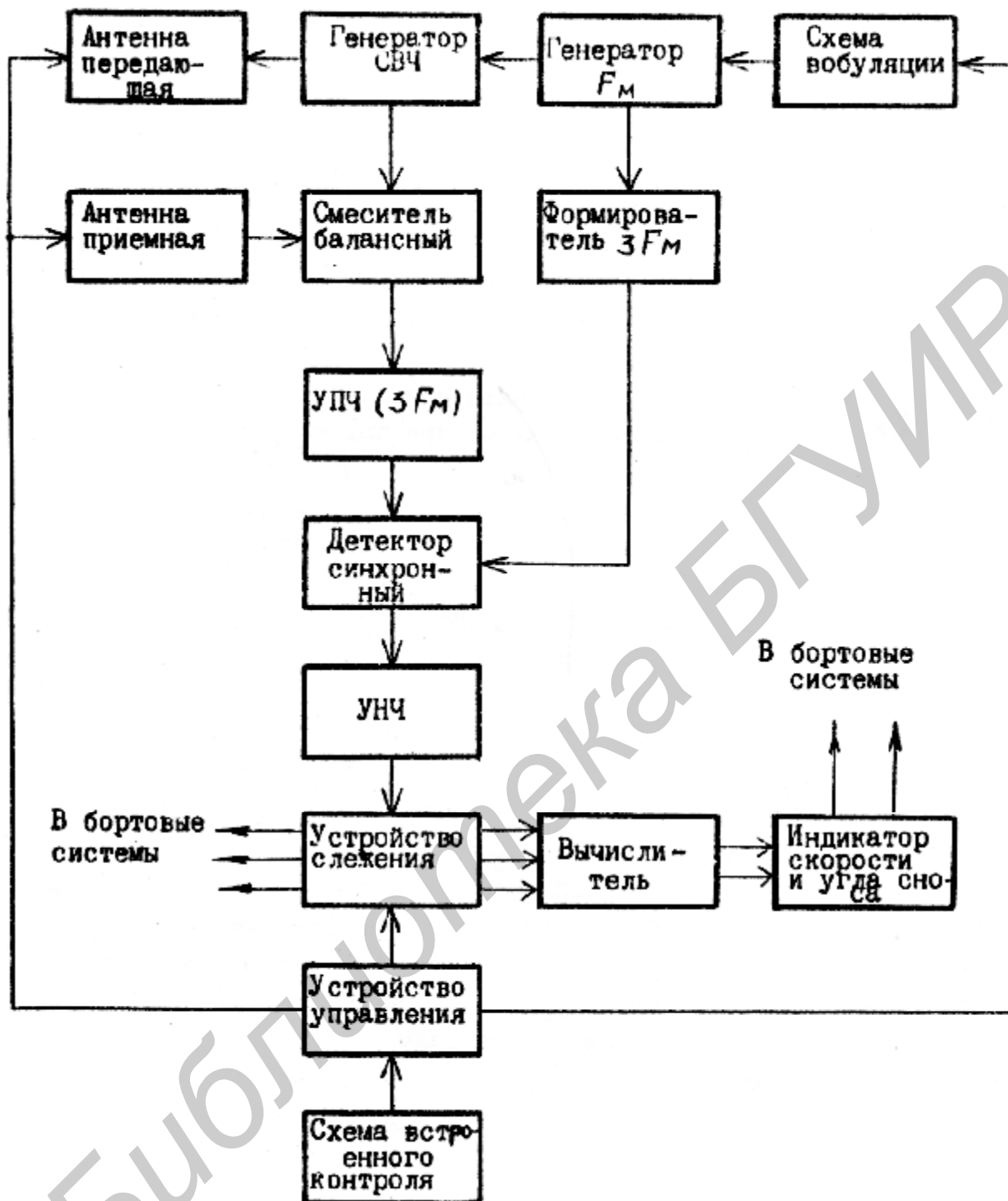


Рис.7

На два входа смесителя подаются доплеровский сигнал с выхода приемника ДИСС и сигнал следящего гетеродина. На выходе смесителя формируется доплеровский сигнал, смещенный по частоте на $f_{\text{Ч}}$. Этот сигнал проходит через фильтр, детектируется амплитудным детектором и поступает на фазовый детектор, на который в качестве опорного подано меандровое напряжение с генератора меандра. Суммарное напряжение с выхода интегратора и генератора меандра U_{Σ} поступает на управитель частоты следящего гетеродина. В результате доплеровский спектр сигнала скачкообразно смещается с периодом T_m относительно резонансной частоты фильтра $f_{\phi 0}$. При совпадении средней частоты этого ЧМ-сигнала с $f_{\phi 0} = f_{\Delta 0} = f_{20} - f_{\partial 0}$ амплитуда напряжения $U_{\phi 0}$ на выходе фильтра в обоих полупериодах меандра одинакова и на фазовый детектор поступает постоянное напряжение. При $f_{\Delta 0} > f_{\phi 0}$ напряжение $U_{\phi 0}$ изменяется по закону меандра одной фазы, а при $f_{\Delta 0} < f_{\phi 0}$ - противоположной фазы, причем амплитуда меандра $U_{\phi 0}$ тем больше, чем больше расстройка $|f_{\Delta 0} - f_{\phi 0}|$. Знак и значение постоянного напряжения на выходе фазового детектора и соответственно на выходе интегратора характеризуют расстройку $(f_{\Delta 0} - f_{\phi 0})$. Управитель частоты будет отрабатывать расстройку до значения $f_{\Delta c} = f_{20} - f_{\partial 0} = f_{c\phi 0}$, где частота $f_{\phi 0}$ заранее известна и тогда $f_{\partial 0} = f_{20} - f_{\phi 0}$ однозначно определяется f_{20} , которая в свою очередь однозначно определяется напряжением с выхода интегратора. Следовательно, напряжение на выходе интегратора однозначно определяет оценку $f_{\partial 0}^*$ и может подаваться на индикатор.

Сравнение характеристик широкополосного и следящего ИСЧ показывает, что для надежной работы частотомера-счетчика необходимо отношение сигнал/помеха ≥ 20 дБ, а для следящего ИСЧ – 0 дБ и даже меньше, что для радиолиний с напряженной энергетикой имеет решающее значение.

Имеются различные модификации следящих ИСЧ, но исходный принцип работы у них общий.

2.3. Режим «Память» в ДИСС

При полете ЛА над морской поверхностью происходит резкое уменьшение обратного отражения радиоволн при наклонном ее облучении. Рассеивающая способность морской поверхности в значительной степени зависит от состояния (волнения) моря - с увеличением волнения моря она повышается. Это вынуждает выбирать угол наклона облучения близким к 70^0 для получения достаточного уровня сигнала на входе ДИСС над большей частью мирового океана. Однако при волнении ниже одного балла этого уровня для работы ДИСС недостаточно. Поэтому при полетах над спокойными участками морской поверхности ДИСС переключается в режим «Память», когда

запоминается последнее правильное измеренное ДИСС значение скорости ЛА до появления входного сигнала достаточного уровня.

При полетах ЛА над морем (песчаной пустыней) возникает нежелательный так называемый «морской эффект», заключающийся в том, что коэффициент переотражения для ближайших к ДИСС участков отражающей площадки выше, чем для отдаленных. Это приводит к неучитываемому смещению максимума огибающей доплеровского спектра в сторону более низких частот на величину, достигающую единиц процентов от $f_{\partial 0}$. Величина смещения существенно зависит от степени волнения моря и плохо поддается компенсации.

Простейшим способом избавления от нежелательных эффектов является вертикальное облучение отражающей поверхности, но при этом отсутствует эффект Доплера. В таких ситуациях лучше применить корреляционный способ измерения путевой скорости и угла сноса, но устройство на его основе значительно сложнее ДИСС. Усложняется и задача компенсации ошибок измерений при наличии крена ЛА. Поэтому корреляционные измерители не нашли широкого применения.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Макет лабораторной установки выполнен на базе современного измерителя ДИСС-013, имеющего следующие характеристики: диапазон измеряемых путевых скоростей 180 – 1300 км/ч, измеряемых углов сноса $\pm 30^{\circ}$, рабочих высот 10 – 15000 м; погрешность измерения путевой скорости 0,5 % и угла сноса $20'$ при горизонтальном полете; рабочая длина волны 3 см; вид излучения – непрерывный ЧМ-сигнал; число лучей – 3 (λ -расположение); время излучения (приема) по одному лучу 0,33 с; время поиска сигнала 60 с; минимально необходимое для слежения отношение сигнал-шум 0 дБ; режимы работы «Суша» и «Море» (в индикаторе скорости вводится поправка, увеличивающая показания); осуществляется автоматический переход в режим памяти (сигнал «Память» поступает в навигационный вычислитель).

Использование сигналов с непрерывным излучением связано с появлением помех при отражении просочившегося сигнала передатчика от вибрирующих элементов конструкций ЛА. Помехи после преобразования попадут в ту же спектральную область частот, что и доплеровский спектр отраженного сигнала. В результате выделения $f_{\partial 0}$ происходит с большей ошибкой. Поэтому применяют ЧМ-сигнал и выделяют $f_{\partial 0}$ при обработке n -й гармоники частоты модуляции в области достаточно высоких частот. В ДИСС-013 используют третью гармонику частоты модуляции $F_M = 1 \text{ МГц}$ и девиацию частоты $\Delta f = 2,4 \text{ МГц}$. Выбор параметров модуляции осуществляется исходя из требований уменьшения влияния просочившегося сигнала на чувствительность приемника и минимизации энергетических потерь для отраженного сигнала из-за использования при обработке только одной гармоники.

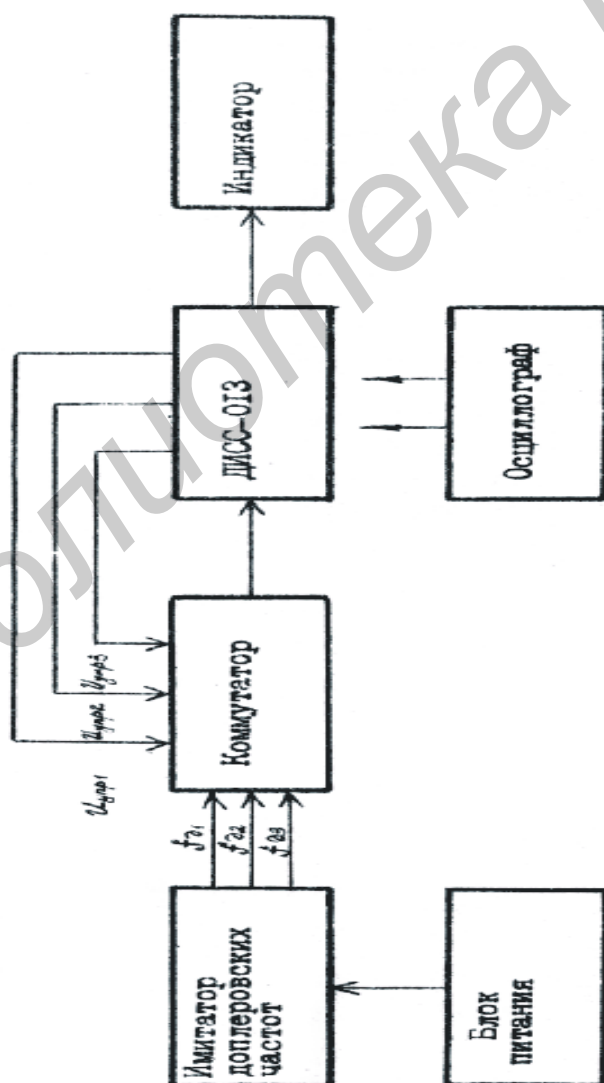
Для уменьшения влияния слепых высот (при которых мощность выделяемого доплеровского спектра может равняться нулю) используется модуляция частоты модуляции F_M по пилообразному закону.

Структурная схема ДИСС-013 представлена на рис. 7. Выделенный в синхронном детекторе доплеровский сигнал поступает в УНЧ, имеющий высокую равномерность амплитудно-частотной характеристики при условии неискажения спектра доплеровского сигнала.

Устройство слежения ДИСС-013 выполняет функции поиска, захвата и слежения за спектром сигнала. Работа устройства, аналогичная работе следящего ИСЧ, рассмотрена в разделе 2.2.

Схема встроенного контроля обеспечивает проверку работоспособности ДИСС путем обработки контрольных задач, а также контроль параметров блоков. Выдача контрольных задач в схему измерения и обработки информации осуществляется путем введения с кварцевых генераторов напряжений, имитирующих доплеровские частоты соответствующих лучей. По одной задаче на индикаторе отрабатываются значения путовой скорости 700 км/ч , $\alpha = 0^0$, по другой – скорость 100 км/ч , $\alpha = 20^0$.

В лабораторной установке используется только низкочастотный блок ДИСС-013, поэтому для нормальной работы введены имитатор доплеровских сигналов и осциллограф для наблюдения эпюр напряжений в контрольных точках. Структурная схема лабораторной установки приведена на рис. 8.



4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить питание макета тумблерами П1 и П2.
2. Перевести переключатели режимов работ в положения «КОНТРОЛЬ» и «СУША».
3. Переключатель контроля режимов работы поставить в положение «Задача 1», при этом индикатор должен показать значение путевой скорости $V=700$ км/ч.
4. Перевести переключатель в режим «Работа», переключатель контроля – в положение «ВЫХ. УНЧ».
5. Включить имитатор доплеровского спектра и подать сигнал с его выхода на гнездо 18-го контрольного разъема на передней панели низкочастотного блока ДИСС. Работоспособность имитатора контролируется встроенным стрелочным приемником.
6. Снять с индикатора значения путевой скорости для положений 1, 2 и 3 переключателя F_d на передней панели имитатора. При работе учесть, что поиск центральной доплеровской частоты осуществляется в течение 30 с.
7. Выключить имитатор.
8. Подключить к макету в качестве имитатора доплеровской частоты (F_d) генератор ГЗ-118. Снять показание путевой скорости ДИСС для заданных значений F_d в нижеприведенной таблице.
9. По формуле $V_{расч} = \frac{k\lambda F_d}{\cos\alpha \cos\beta \cos\theta}$ рассчитать коэффициент пропорциональности вычислителя путевой скорости ДИСС, если $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 36^\circ$, $\theta = 64^\circ$, $V_{расч} = 700$ км/ч, $\lambda = 3$ см, $F_d = 4$ кГц.
10. Поместить в нижеприведенную таблицу результаты измерений и расчета $-V_{расч}$.
11. Рассчитать ошибки δ и $\delta\%$.
12. Рассчитать для снятых экспериментальных данных п.6.
13. Рассчитать диапазон доплеровских частот, в котором работает ИСЧ ДИСС, если $V = 180$ км/ч и $V = 1300$ км/ч.

$F_d, \text{Гц}$	1	2	3	4	5	6	7
$V_{изм}$							
$V_{расч}$							
$\delta\% = (\delta / V_{расч}) 100$							
$\delta = V_{изм} - V_{расч}$							

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели работы.
2. Функциональную схему лабораторной установки.
3. Эпюры напряжений в контрольных точках.
4. Графики экспериментальных и расчетных зависимостей.
5. Общие выводы и замечания по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните способы измерения радиальной скорости цели с помощью РТС.
2. Что такое навигационный треугольник?
3. Поясните принцип действия однолучевого ДИСС.
4. Почему используют многолучевые ДИСС?
5. Поясните структуру доплеровского спектра.
6. Поясните принцип действия широкополосного измерителя средней частоты доплеровского спектра.
7. Поясните принцип действия следящего ИСЧ.
8. Поясните принцип работы ДИСС-013 по структурной схеме.
9. Какова погрешность измерений путевой скорости и угла сноса в ДИСС-013?

ЛИТЕРАТУРА

1. Веницкий А.С. Автономные радиосистемы. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
2. Власов О.В., Смокин И.В. Радиооборудование летательных аппаратов. – М.: Воениздат, 1971. – 360 с.
3. Радиолокационные системы летательных аппаратов/ Под ред. П.С. Давыдова. – М.: Транспорт, 1977. – 352 с.

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ РТС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ПУТЕВОЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе
по дисциплине «Системы радионавигации»
для студентов специальности «Радиоэлектронные системы»
всех форм обучения

Составитель
Устименко Виктор Григорьевич

Редактор Н.А. Бебель
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка А.В. Устименко

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная.

Печать изографическая.

Гарнитура «Таймс».

Усл.

печ. л.

Уч.- изд. л. 0,8.

Тираж 100 экз.

Заказ 768.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП № 156 от 30. 12. 2002.

Лицензия ЛВ № 509 от 03.08. 2001.

220013, Минск, П. Бровки, 6.