

**САМАРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени академика
С.П. КОРОЛЕВА**

*А.И. Данилин
А.Н. Коптев
Н.А. Кузьмичев*

**РАДИОСИСТЕМЫ
ДАЛЬНОЙ
НАВИГАЦИИ**

САМАРА 1997

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА

А. И. Данилин, А. Н. Коптев, Н. А. Кузьмичев

**РАДИОСИСТЕМЫ
ДАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ**

Учебное пособие

САМАРА 1997

УДК 629.7.058.2(083)

Радиосистемы дальней навигации: Учеб. пособие /
А. И. Данилин, А. Н. Колтев, Н. А. Кузьмичев. Самар. гос. аэрокосм.
ун-т. Самара, 1997. 36 с.
ISBN 5-7883-0017-7

Приводятся сведения по методам построения и принципам работы систем дальней радионавигации. Для каждой из рассматриваемых систем даются конкретные физические соотношения и виды сигналов, заложенные в основу их функционирования. Приводятся тактико-технические характеристики отечественных и зарубежных радионавигационных систем.

Пособие рассчитано на студентов специальностей "Самолетостроение", "Техническая эксплуатация электрифицированных систем и пилотажно-навигационных комплексов", некоторых радиотехнических специальностей, а также может быть полезно инженерно-техническим работникам АТБ. Выполнено на кафедре КиПЛА.
Ил. 18.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва

Рецензенты: В. Г. Сафонов, Л. М. Логвинов

ISBN 5-7883-0017-7

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 1997
© А. И. Данилин, А. Н. Колтев,
Н. А. Кузьмичев, 1997

ВВЕДЕНИЕ

Навигация (от лат. *navigo* — плыву на судне) — наука о способах выбора пути и методах вождения транспортных средств. Задачи навигации — нахождение оптимального маршрута, определение местонахождения, направления и скорости движения транспортного средства.

Радиотехническая система дальней навигации решает в основном задачу определения местонахождения и служит для обеспечения самолетовождения на расстояниях максимального удаления от пунктов взлета и посадки. В настоящее время применяются дальномерная и разностно-дальномерная (гиперболическая) системы.

Идея дальномерной системы тривиальна. Пусть имеется наземная, так называемая опорная радиостанция, которая излучает импульсы в строго определенные моменты времени. Принимая на борту эти импульсы и фиксируя время приема, можно определить временную задержку $\Delta t = (t_{\text{приема}} - t_{\text{излучения}})$, которая пропорциональна дальности от самолета до радиостанции. Теперь штурман на карте может провести окружность с центром в точке нахождения опорной радиостанции и радиусом, равным дальности до нее. Определяя дальность до другой опорной радиостанции и проводя вторую окружность, на их пересечении находим местоположение самолета. Однако точек пересечения окружностей — две, поэтому имеет место неоднозначность в определении координат самолета. Для устранения неоднозначности необходимо на борту использовать другие средства навигации, или третью опорную радиостанцию для определения района предполагаемого местонахождения самолета так, чтобы ему соответствовала только одна из точек пересечения окружностей. Главная особенность и, собственно, трудность реализации этой идеи состоит в том, что **на борту** нужно знать истинное время излучения импульса опорной радиостанцией.

Разностно-дальномерная система использует основное свойство гиперболы. Напомним, что **гипербола** — это геометрическое место точек, *разность расстояний* от которых до двух точек, называемых фокусами, есть величина постоянная.

Наземные радиостанции А, Б, В установлены на некотором заранее известном расстоянии друг от друга. Одна из них, пусть станция А, является ведущей, а две другие — ретрансляторы. Несущие частоты всех станций одинаковы, и их работа строго синхронизирована.

Станция А излучает импульсы через определенные, строго постоянные промежутки времени. Эти импульсы принимаются станцией Б и затем после некоторой задержки на $t_{зд}$ ретранслируются. Задержка вводится для того, чтобы на борту самолета отличить импульсы ведущей и ведомой радиостанций. Время запаздывания в приходе на борт самолета импульса от ведомой станции Б относительно импульса ведущей станции А равно (рис. 1)

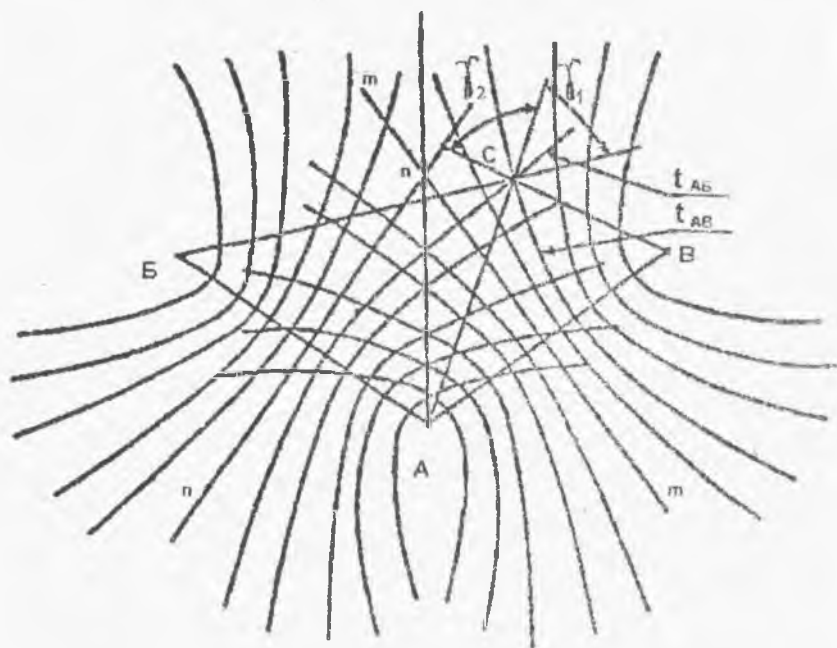


Рис. 1

$$\Delta t_1 = t_{ABC} - t_{AC} + t_{зд} = (AB + BC)/c + t_{зд} - AC/c = (BC - AC)/c + [AB/c + t_{зд}] = (BC - AC)/c + \text{const.}$$

Здесь c — скорость распространения радиоволн. Отсюда видно, что каждому времени запаздывания соответствует своя гипербола. Проводя аналогичное измерение разности времени:

прихода сигнала для второй пары станций, например А и В, определим вторую гиперболу. Точка пересечения двух гипербол указывает местоположение самолета. В первых системах дальней навигации для оперативной работы штурмана при наземной подготовке полета на карте тушью различного цвета наносились гиперболы для каждой пары станций с информацией о частоте повторения импульсов и разности времени в микросекундах их прихода на борт. В современных системах принятые радиосигналы обрабатывает бортовой компьютер и сразу выдает географические координаты самолета.

1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

База опорных станций — расстояние между двумя опорными радиостанциями системы (см. станция опорная).

Станция опорная — передающая станция радиосистемы дальней навигации, обеспечивающая всенаправленное излучение сигналов, которое синхронизировано с излучением сигналов другими опорными станциями системы.

Цепочка опорных станций — совокупность опорных станций, создающая семейство линий положения радиосистемы дальней навигации. Минимальное количество станций — три.

Сигнал опорной станции поверхностный (пространственный) — сигнал, передаваемый поверхностными (пространственными) электромагнитными волнами.

Диаграмма сигнала временная — последовательность сигналов, излучаемых опорными станциями радионавигационной системы.

Цикл излучения опорной станции — интервал времени повторения излучения опорной станцией группы рабочих частот или чакет сигналов.

Формат сигнала — совокупность частотных и временных параметров, описывающих излучаемый или принимаемый сигнал.

Линия положения системы — линия, каждой точке которой соответствует одинаковое значение какой-либо характеристики радионавигационной системы. Для дальномерных систем это окружности, для разностно-дальномерных — гиперболы.

Семейство линий положения — совокупность не пересекающихся в зоне действия радионавигационной системы линий положения системы.

Зона действия системы дальней навигации — область земной поверхности и околоземного пространства, в пределах которой погрешность определения местоположения транспортного средства не превышает заданного значения.

Дорожка фазовая — область, ограниченная двумя соседними линиями положения, отличающимися на 2π по фазовому сдвигу и принадлежащими одному семейству. В пределах фазовой дорожки возможно однозначное определение фазового сдвига $0 < (\varphi_A - \varphi_B) < 2\pi$, а значит и разности расстояний до опорных станций А и Б.

Потребитель навигационной информации — объект, использующий какую-либо систему для определения навигационных параметров. Обычно потребитель — это транспортное средство.

Синхронизация — поддержание равных частот и постоянной разности фаз генераторов опорных станций или опорных станций и аппаратуры потребителей.

Система радионавигационная дальномерная — радионавигационная система, навигационным параметром которой является расстояние от потребителя до опорной станции. Линией положения здесь является окружность.

Система радионавигационная разностно-дальномерная — радионавигационная система, навигационным параметром которой является разность расстояний от подвижного объекта до двух наземных опорных радиостанций. Линией положения здесь является гипербола.

Система радионавигационная дифференциальная — радионавигационная система, имеющая контрольную станцию, с помощью которой определяются поправки на распространение радиоволн, используемые для повышения точности аппаратуры потребителя в зоне действия контрольной станции.

Система радионавигационная квазидальномерная — радионавигационная система, в которой измеряется квазидальность, т. е. расстояние от потребителя до опорной станции с погрешностью, вызванной сдвигом шкал времени аппаратуры потребителя и опорной станции.

Система радионавигационная пассивная — радионавигационная система, бортовая аппаратура которой не содержит устройств, излучающих радиосигналы.

Геометрический фактор — устанавливает зависимость точности местоопределения транспортного средства от угла пересечения двух линий положения.

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ТИПЫ СИСТЕМ ДАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Радиосистемы дальней навигации (РСДН) — относятся к классу многопозиционных радионавигационных систем и предназначены для определения местонахождения ЛА на расстояниях до нескольких тысяч километров или в пределах земного шара (глобальные системы). Все системы дальней навигации работают в пассивном режиме в диапазоне километровых (длинных) или мириаметровых (сверхдлинных) волн, где требуемая дальность действия обеспечивается с помощью сигналов поверхностных волн.

Основа РСДН — сеть наземных опорных радиостанций с дальностью действия (в зависимости от системы) от 1 тыс. до 12 тыс. км. Основная задача опорных радиостанций — формирование и излучение навигационного сигнала в формате, зависящем от разновидности системы дальней навигации. Передатчики опорных станций снабжены эталонами времени и частоты (ЭВЧ) с долговременной стабильностью $10^{-9} \dots 10^{-12}$ и синхронизированы со шкалой Всемирного координированного времени (UTC).

Аппаратура потребителей на основе принятых радиосигналов от опорных станций вырабатывает информацию о местоположении ЛА. Эта информация используется для определения отклонения ЛА от заданной траектории полета и коррекции автономных систем счисления пути, а также в индикаторах навигационной обстановки для указания текущего положения ЛА на карте.

Навигационный параметр РСДН — дальности от ЛА до опорных станций или разность расстояний от ЛА до двух опорных станций (дальномерные или разностно-дальномерные системы). Все РСДН проектировались как разностно-дальномерные. Достижения в области малогабаритных эталонов времени и частоты позволяют использовать РСДН в дальномерном варианте и повысить их точность.

Основной информативный параметр РСДН — фаза колебаний несущей частоты (фазовые системы). Извлечение из фазы навигационных параметров на борту ЛА основано на *когерентности*

колебаний несущей частоты, которая достигается с помощью взаимно синхронизированных атомных эталонов времени и частоты на опорных радиостанциях.

Типы РСДН отличаются форматом навигационного сигнала и дальностью действия. Наибольшее распространение получили системы типа LORAN-A, РСДН-20 и Omega. Все РСДН рассчитываются на избыточность информации, когда в зоне действия системы возможен прием большего, чем необходимо для определения местоположения ЛА, числа сигналов опорных станций. Избыточность позволяет выбрать оптимальный в смысле точности набор опорных станций (по критерию минимума помех и геометрического фактора (ГФ) и максимума отношения сигнал/помеха).

Система LORAN-A — импульсная, образована цепочками импульсов, излученных ведущими и ведомыми станциями. С помощью одной цепочки определяется одна линия положения. Опорные станции работают на частоте около 2 МГц и излучают одиночные радиоимпульсы, следующие с периодом $T_{\text{сл}}$. Величина кодовой задержки $t_{\text{зд}} > 0,5 T_{\text{сл}}$.

Система Omega — фазовая РСДН, основу которой составляют восемь независимых опорных станций (А, В, С, ..., Н), расположенных так, чтобы получить глобальную зону действия, то есть перекрыть всю поверхность земного шара. Избыточность системы снижает чувствительность ее к отказам одной или двух опорных станций. Для разделения сигналов опорных станций используется частотно-временной принцип. Работа всех опорных станций синхронизирована по сигналам службы единого времени. Навигационный параметр определяется по фазовому сдвигу принимаемых сигналов. Рабочие частоты опорных станций от 10 до 14 кГц. В дальномерном варианте используются также сигналы наземных радиостанций, работающих на частотах 10...20 кГц.

Радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 с бортовой аппаратурой А-722-04 и А-722-05 предназначена для определения местоположения объекта в любое время года и суток, в любых метеоусловиях (исключая местные грозы) при работе комплекса в зонах действия фазовых радионавигационных систем РСДН-20 и Omega. **Варианты исполнения:** А-722-04 работает на антенну открытого типа по сигналам системы Omega или, по выбору оператора, на всех рабочих каналах системы РСДН-20; А-722-05 работает аналогично А-722-04, но от рамочной антенны, входящей в состав ее аппаратуры.

Основные технические данные

Масса: А-722-04 - 82кг; А-722-05 - 87кг.

Параметры охлаждающего воздуха для ЦВМ 20-13:

Массовый расход не менее 60 кг/ч при $t = 20^{\circ} \text{C}$, или не менее 38 кг/ч при $t = 0^{\circ} \text{C}$.

Состав изделия: машина цифровая вычислительная ЦВМ 20-13; пульт управления и индикации А-722-1; моноблок А-716-2; фильтр радиопомех ФРП 20-1мк.

Электропитание

Наименование источника	Напряжение [В]	Ток [А]	
		А-722-04	А-722-05
Трехфазная сеть переменного тока 200 В, 400 Гц	200 ± 5	1	1
Сеть переменного однофазного тока 115 В, 400 Гц	115 ± 6	1.3	1.3
Трехфазная сеть переменного тока 36В, 400 Гц	$36_{-3.6}^{+1.8}$	0.002	0.002
Сеть постоянного тока 27 В	27 ± 3	2.3	2.3

3. ФАЗОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Принцип определения координат объекта по сигналам радионавигационных систем РСДН-20 и Omega заключается в приеме и измерении *разности фаз* сигналов, излученных наземными опорными станциями, и пропорциональной *разности расстояний* до этих станций.

Пусть в момент времени t_0 фазы радиосигналов, излученных передающими устройствами двух наземных станций А и В одинаковы и имеют вид

$$\Psi_1 = \Psi_2 = \omega t_0, \quad (1)$$

где ω – несущая частота радиосигнала. При прохождении пути до подвижного объекта электромагнитные колебания (радиоволны) сдвигаются по фазе на величины, про-

порциональные пройденным расстояниям r_A и r_B (рис.1). В точке приема разность фаз $\Delta\Psi$ составит

$$\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_2 = \left(\omega t_0 - \omega \frac{r_A}{c} \right) - \left(\omega t_0 - \omega \frac{r_B}{c} \right), \quad (2)$$

где c — скорость распространения радиоволн. Отсюда следует, что

$$\Delta r = r_A - r_B = \frac{c \cdot \Delta\Psi}{\omega} = \frac{\lambda_H}{2\pi} \cdot \Delta\Psi, \quad (3)$$

где λ_H — длина несущей волны высокочастотных колебаний.

Выражение (3) устанавливает связь между разностью фаз колебаний, принимаемых на подвижном объекте в точке С на рис.1, и разностью расстояний r_A и r_B от объекта до наземных опорных радиостанций. По измеренной разности фаз $\Delta\Psi$ можно определить линию положения, которой соответствует $\Delta r = const$. Поскольку кривая, для которой разность расстояний от любой ее точки до двух фиксированных точек есть величина постоянная, называется **гиперболой**, то относительно точек А и В можно построить семейство гипербол с различными значениями Δr , которые и будут линиями положения. Место объекта, точка С на рис.1, находится на пересечении двух гипербол, построенных относительно фокусов А, В и А, Б.

Связь разности фаз $\Delta\Psi$ и разности расстояний Δr неоднозначна. Пусть точка приема находится на нормали к центру базы (линия $n-n$ на рис.1) и тогда $\Delta r = 0$ и $\Delta\Psi = 0$. По мере отклонения от этой линии будет возрастать $|\Delta r|$ и, соответственно $\Delta\Psi$. Когда $\Delta r = \lambda_H$, разность фаз достигнет значения $\Delta\Psi = 2\pi$; при дальнейшем увеличении $|\Delta r|$ начнется второй цикл изменения разности фаз. Разность фаз будет изменяться циклически, **одинаковые** отсчеты возможны через каждые 2π , или, что эквивалентно, через $\Delta r = \lambda_H$. Вследствие того, что измерители разности фаз дают отсчеты в пределах одного фазового цикла (от нуля до 2π), появляется неопределенность в отсчетах, их неоднозначность.

Для устранения этой неоднозначности, то есть для определения количества **полных** фазовых циклов, которые укладываются на измеряемой разности расстояний Δr , каждая наземная опорная станция системы излучает сигналы на нескольких несущих частотах. При радиоизлучениях на нескольких несущих частотах ω , а значит и разной длины волны $\lambda_H = 2\pi c / \omega$, создается несколько **разномасштабных** сеток, причем

чем ниже частота излучения, тем грубее сетка. В самом деле, рассмотрим формирование фазовой дорожки, см. рис. 2.

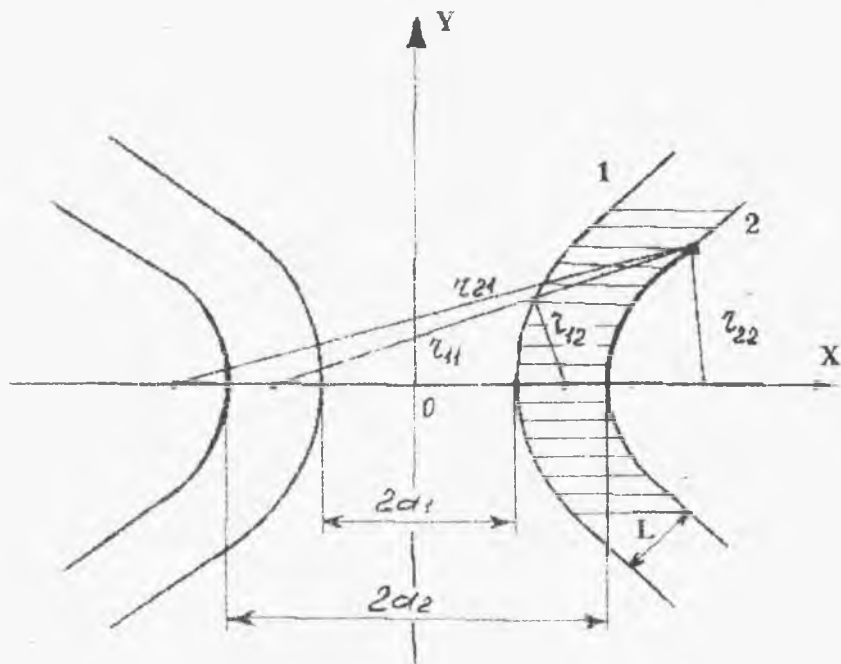


Рис. 2

Для гиперболы 1 на основании ее свойств можно записать:

$$2a_1 = (r_{11} - r_{12}) = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\Psi_1. \quad (4)$$

Для гиперболы 2, отстоящей от первой на 2π по фазовому сдвигу, имеем

$$2a_2 = (r_{21} - r_{22}) = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\Psi_2. \quad (5)$$

Ширина фазовой дорожки будет равна

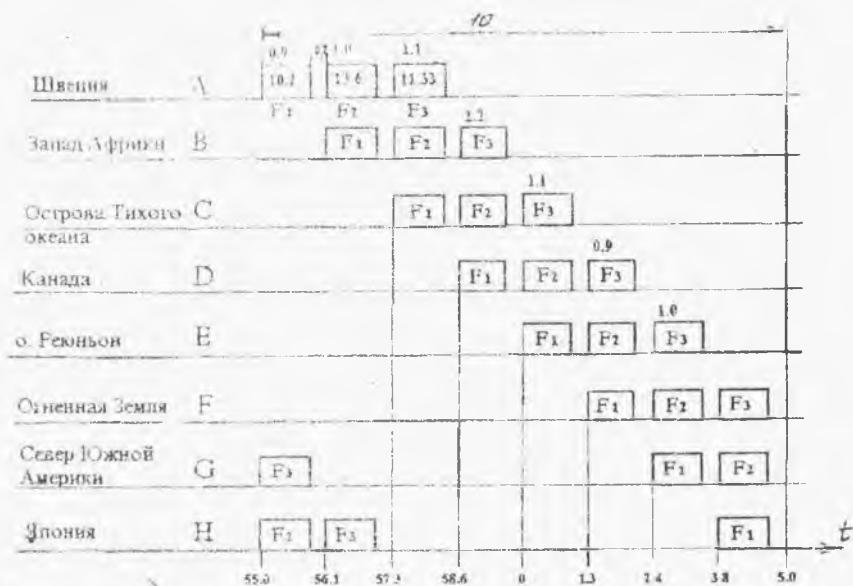
$$2L = 2a_2 - 2a_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot (\Delta\Psi_2 - \Delta\Psi_1). \quad (6)$$

Поскольку $(\Delta\Psi_2 - \Delta\Psi_1) = 2\pi$, то $L = c / (2F) = \lambda / 2$. Чтобы специально не излучать дополнительные радиосигналы для формирования грубых сеток, используется разность несущих частот опорных станций, которая называется *разностной частотой*, и относительно нее также определяется фазовый сдвиг $\Delta\Psi$. В этом случае приемник должен снимать отсчеты разностей фаз на всех частотах опорных станций, а затем образовывать их разности. Один из снятых отсчетов дает точное указание на линию положения, а отсчеты по разностным частотам служат для устранения многозначности. Определение координат по сигналам радионавигационной системы возможно лишь в пределах *зоны действия системы*, см. термины и определения

Особенностью *разностно-дальномерной* радионавигационной системы является то, что по мере удаления ЛА от наземных опорных станций линейная мера расстояния на единицу измерения фазового сдвига увеличивается. Это изменение характеризуется *геометрическим фактором*, который устанавливает зависимость точности местоопределения ЛА от угла пересечения двух линий положения $\gamma = 0.5(\gamma_1 + \gamma_2)$, см. рис. 1. На краю зоны действия системы он возрастает, погрешность от геометрического фактора зависит линейно.

Наземная часть системы Omega состоит из восьми передающих станций, радиосигналы которых принимаются на расстояниях до 12...14 тысяч км от них. Чтобы перекрыть этими радиосигналами всю поверхность Земли, станции размещены на расстояниях от 9000 км до 11000 км друг от друга. Мощность излучения каждой станции не менее 10 кВт.

Наземные станции системы Omega излучают синфазные (когерентные) электромагнитные колебания на трех несущих частотах $F_1 = 10,2$ кГц, $F_2 = 13,6$ кГц, $F_3 = 11,33$ кГц. Для точных навигационных определений предназначены колебания одной частоты $F_1 = 10,2$ кГц. Временная диаграмма излучения наземных станций имеет вид:



Цикл диаграммы составляет 10 с и начинается с излучения сигнала станцией E, расположенной в Индийском океане на о. Реюньон. Начало излучения каждой посылки синхронизировано с сигналами международного стандарта времени. Для исключения взаимных помех сигналы излучаются в строгой временной последовательности. Колебания основной частоты F_1 обуславливают ширину дорожек точного определения линий положения, равную $c/(2F_1) = 14.7$ км. Аналогично можно определить ширину фазовых дорожек, которые устраняют первую и вторую степени многозначности определения местоположения ЛА. Так, для разностной частоты $(F_2 - F_1) = 3.4$ кГц ширина дорожки составляет $c/2(F_2 - F_1) = 44.5$ км, а для разностной частоты $(F_3 - F_1) = 1.33$ кГц она составляет $c/2(F_3 - F_1) = 133.3$ км.

Для определения местоположения ЛА в системе Omega используется метод грубого и точного отсчета (рис. 3). Сначала система определяет район нахождения ЛА с шириной фазовой дорожки 133.3 км. Затем в этом районе отыскивается область шириной 44.5 км, потом в ней определяется зона шириной 14.7 км и лишь тогда в этой зоне определяется точное местоположение ЛА.

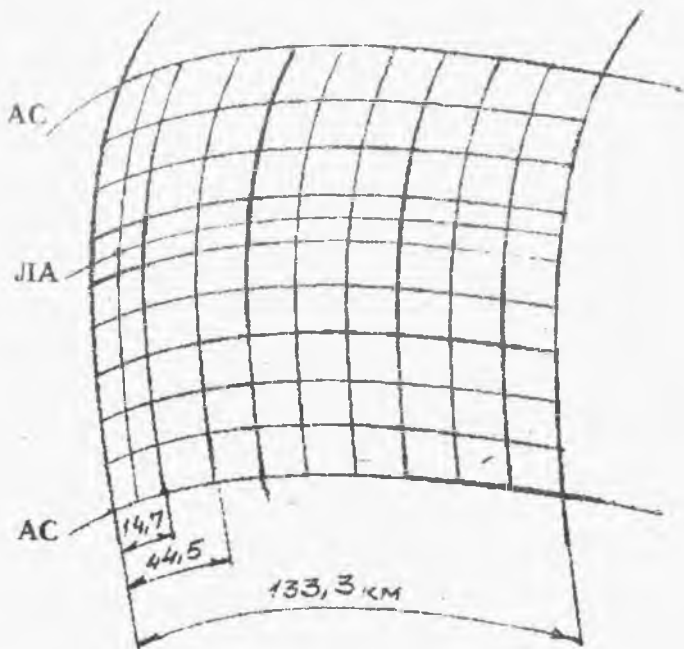


Рис. 3

В бортовом приемоиндикаторе электромагнитные колебания F_1, F_2, F_3 всех станций принимаются в заданной последовательности и запоминаются в отдельных каналах памяти бортовой ЦВМ. Следящие системы приемоиндикатора измеряют разности фаз $\Delta\varphi_{AB}$ принятых колебаний, то есть определяют разность расстояний до каких-либо станций, условно обозначенных А и Б. В приемоиндикаторе также формируются разностные частоты $F_{p1} = (F_2 - F_1)$ и $F_{p2} = (F_3 - F_1)$, которые используются для устранения многозначности отсчетов. В системе Omega измерение фаз основано на цифровом методе (рис. 4).

1) U_c — принимаемый сигнал; U_o — сигнал эталонного генератора.

2) Рабочие импульсы, сформированные из принятых синусоидальных сигналов;

3) Счетные импульсы на входе одного из счетчиков.

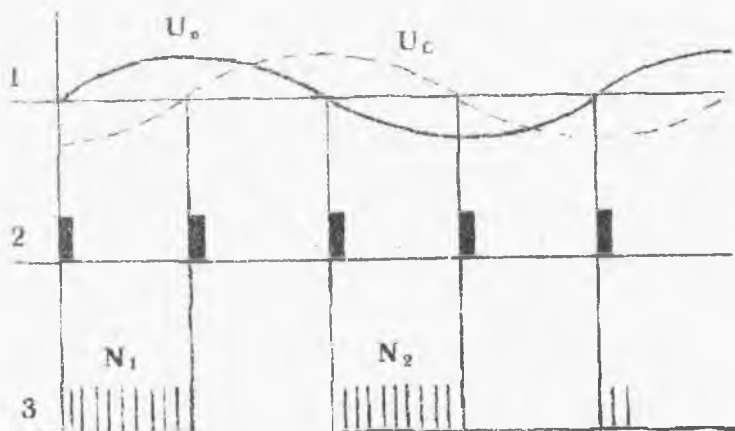


Рис. 4

В моменты перехода U_c и U_o через нулевые значения формируются импульсы, управляющие работой электронных ключей. Через ключи счетные импульсы, вырабатываемые электронным генератором, и следующие, например, с частотой $f_{СИ} = 2.5$ Мгц, заполняют интервал между рабочими импульсами. Счетные импульсы поступают на счетчик, и их количество N является мерой искомого фазового сдвига: $\Delta\varphi = N\omega / (2f_{СИ})$, где ω — частота, на которой проводится измерение фазы.

Отечественная сверхдлинноволновая система дальней навигации РСДН-20 построена по тому же принципу, что и система Omega. Имеются три наземные опорные станции, которые излучают сигналы *каждая* на трех частотах F_1, F_2, F_3 . Длительность сигналов на всех частотах одинакова и равна 0,4 с. с периодом повторения 3,6 с. Диаграмма излучения каждой станции показана на рис. 5. Здесь F_1 — основная частота для точных фазовых измерений; F_2 и F_3 — для образования отсчетов на разностных частотах $F_{p1} = (F_2 - F_1)$ и $F_{p2} = (F_3 - F_1)$, для устранения неоднозначности точных фазовых отсчетов.

Ведущая станция А излучает дополнительный сигнал на частоте F_{11} , который используется для синхронизации при приеме сигналов бортовым приемоиндикатором.

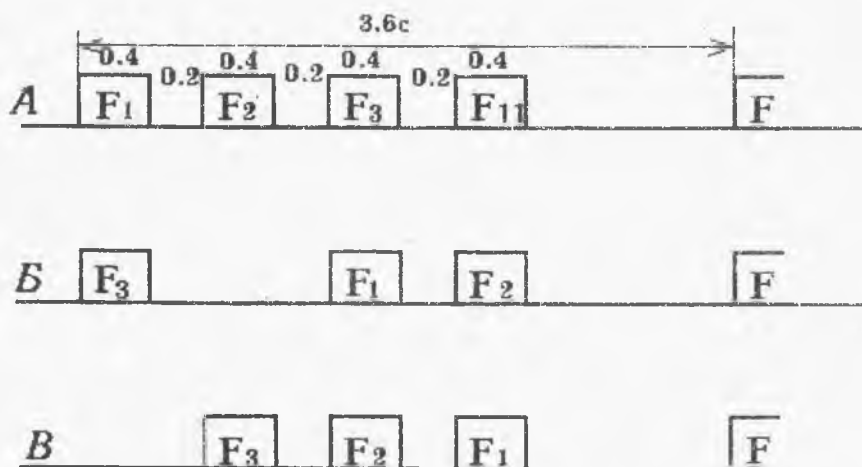


Рис. 5

Характерной особенностью сверхдлинных волн является их способность почти полностью отражаться как от нижнего слоя ионосферы, так и от поверхности Земли. Сверхдлинные волны распространяются в сферическом волноводе между направляющими Земля-ионосфера. В годы спокойной солнечной активности в дневное время средняя высота слоев ионосферы, отражающих радиоволны, составляет 70 км, ночью — 90 км. Изменение высоты волновода в зависимости от освещенности его верхней направляющей поверхности (ионосферы) приводит к закономерным изменениям фазовой скорости распространения сверхдлинных волн в течение суток. Фазовая скорость волн уменьшается с наступлением ночи (высота волновода увеличивается) и увеличивается днем, достигая максимума, когда высота природного волновода минимальна. Кроме того, фазовая скорость распространения сверхдлинных радиоволн зависит и от проводимости подстилающей поверхности Земли.

На освещенных участках трассы распространения сверхдлинных волн наблюдается наибольшая стабильность фазовой скорости.

Изменение геометрических размеров природного волновода в зависимости от высоты Солнца над горизонтом приводит к суточным, сезонным и годовым изменениям фазовой скорости,

поэтому все радионавигационные измерения по сигналам радионавигационных систем корректируются компенсирующими поправками. Поправки рассчитываются в бортовой ЦВМ по специальным алгоритмам и автоматически добавляются в измеренные разности фаз на всех частотах, включая разностные, до выполнения операций устранения неоднозначности точных отсчетов.

4. ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время наиболее распространенными системами этого типа являются отечественные *Тропик-2*, *Тропик-2 — подвижный* и зарубежные *LORAN-C* и ее мобильный вариант *LORAN-D*. Принцип определения координат ЛА на его борту по сигналам импульсно-фазовой радионавигационной системы заключается в следующем.

Наземные опорные станции работают синхронно между собой и излучают когерентные импульсные радиосигналы со стабильной частотой повторения. Моменты излучения сигналов ведомыми станциями *Б* и *В* задержаны относительно моментов излучения сигналов ведущей станции *А* на время, называемое *кодовой задержкой* (t_k) и имеющее свою оригинальную величину для каждой из ведомых станций цепочки. В точке приема *С*, см. рис. 1, производится измерение временного интервала

$$\Delta t = t_{AB} + t_k + (t_B - t_A), \quad (7)$$

где t_B , t_A — время распространения радиоволн от станций *Б* и *А* до летательного аппарата *С*; t_{AB} — время распространения радиоволн вдоль базы опорных станций *АБ*; t_k — кодовая задержка для станции *Б*. Значения кодовых задержек для каждой станции выбираются такими, что независимо от местоположения объекта *С* всегда обеспечивается прием сначала сигналов ведущей станции *А*, а затем (по времени) сигналов ведомых станций, то есть всегда обеспечивается положительность величины интервала времени $[t_k + (t_B - t_A)] > 0$.

Зная t_k и t_{AB} и измеряя Δt , можно определить навигационный параметр $\Delta\tau = (t_B - t_A)$, пропорциональный разности расстояний до двух наземных станций *А* и *Б*: $\Delta R = \vartheta \Delta\tau$, где ϑ — скорость распространения радиоволн в атмосфере Земли.

В системе LORAN-C опорные радиостанции географически размещены так, чтобы обеспечить уверенное самолетовождение на авиалиниях с высокой интенсивностью движения:

- SL-1 — средиземноморская цепочка станций;
- SL-3 — северо-восток Атлантического океана (Норвежская цепочка);
- SL-7 — север Атлантического океана;
- SS-1 — север Тихого океана (Алеутская цепочка);
- SS-3 — северо-запад Тихого океана (Японская цепочка);
- SS-7 — восточное побережье Северной Америки;
- S-1 — центральная часть Тихого океана.

В системе имеется три группы основных периодов следования импульсов, соответствующих частотам.

SS — (slow special) - 10 Гц;

SL — (slow low) - 12.5 Гц;

SH — (slow high) - 16.66 Гц.

Поскольку существует целая сеть передающих станций импульсно-фазовой радионавигационной системы, состоящая из отдельных цепочек станций, то для их распознавания используются различные периоды повторения импульсов. Для системы LORAN-C эти периоды повторения сигналов T_0 составляют 100, 80, 60, 50 тысяч микросекунд. Кроме того, для каждого основного периода имеются 7 дополнительных периодов, каждый из которых отличается от соответствующего основного в меньшую сторону на 100, 200, 300, 400, 500, 600 и 700 мкс.

Излучение импульсных сигналов наземными передающими станциями производится в строгой временной последовательности (рис. 6).

Ведущая станция А излучает пачку из девяти импульсов, причем восемь из них отстоят друг от друга на 1000 мкс, а последний, девятый на 1890 мкс для системы LORAN и на 2000 мкс для системы Тропик. Он является вспомогательным для визуального отделения сигналов ведущей станции. Ведомые станции излучают пачки из восьми радиоимпульсов, отстоящих друг от друга на 1000 мкс.

Для автоматического обнаружения и опознавания станций системы, а также для увеличения помехозащищенности используется фазовое кодирование импульсов в пачках сигналов всех станций. На рис. 6 знаком 'плюс'

обозначено значение фазового сдвига, равное нулю, а знаком 'минус' — значение фазового сдвига, равное 180° . Такое кодирование называется **фазовой манипуляцией**. Код фазовой манипуляции ведущей станции отличается от кода ведомых станций. Для всех ведомых станций одной цепочки код одинаков.

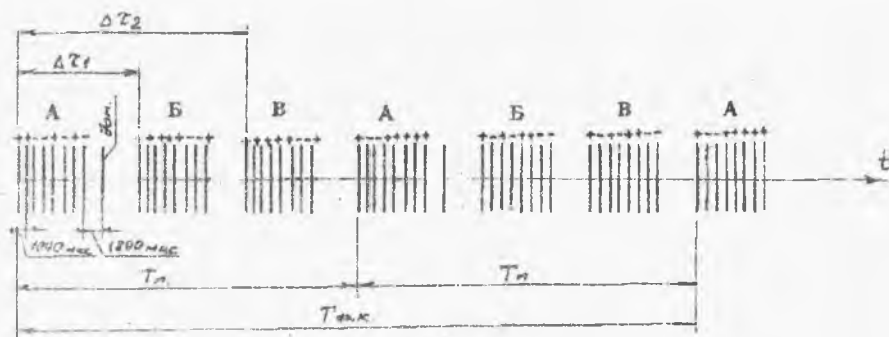


Рис. 6

Исходя из условий получения достаточной точности определения местоположения ЛА, оператор может выбрать требующиеся ему две пары станций без каких-либо ограничений. Сигналы от передающих станций могут приходить как поверхностной (вдоль земной поверхности), так и пространственной волной (отражаясь попеременно от ионосферы и от Земли). Фаза и амплитуда пространственного сигнала нестабильны во времени. Поэтому определение навигационных параметров производится в основном по поверхностному сигналу. Пространственный сигнал вообще-то искажает импульсы, пришедшие по поверхностной волной, но остается неискаженным участок на переднем фронте этого импульса длительностью от 30 до 40 мкс, поэтому только этот участок используется для измерения навигационного параметра (рис. 7). На предельных удалениях от опорной станции амплитуда поверхностного сигнала значительно падает и поэтому работа системы в этом случае осуществляется по пространственному сигналу с учетом поправки на его задержку относительно поверхностного. Искажение формы огибающей является результатом интерференции указанных волн (рис. 7).

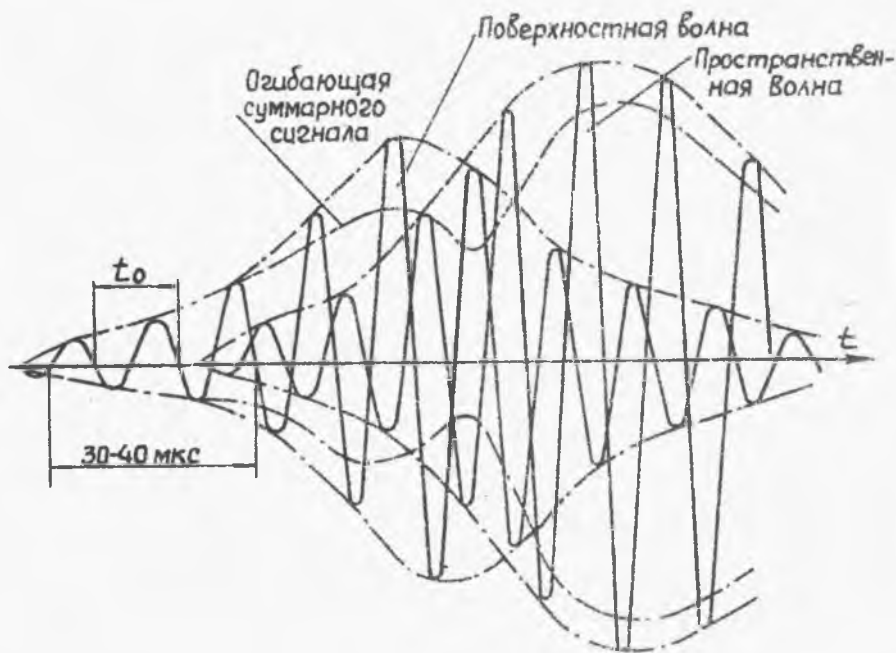


Рис. 7

В бортовой аппаратуре А-711 принят фазовый метод обработки сигнала. В радиоприемном устройстве из принятого сигнала формируется нормализованный сигнал, у которого точка перехода через нуль совпадает с точками перехода через нуль принимаемого сигнала. На выходе приемного устройства формируется три вида нормированного сигнала.

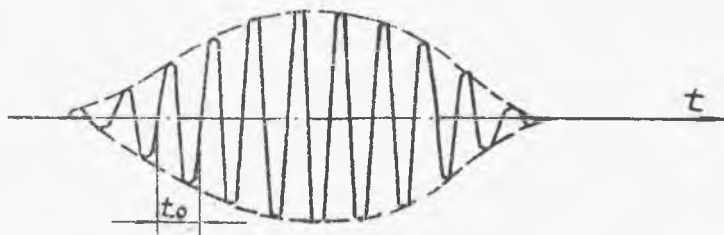
Первый используется при поиске сигналов станций и формируется из принимаемого сигнала, прошедшего через согласованный фильтр, у которого $\Delta F_{0,7} = 5$ кГц, для получения максимума отношения сигнал/шум (рис.8,б).

Второй нормированный сигнал предназначен для использования при слежении за фазой сигнала и формируется из принимаемого сигнала, прошедшего через широкополосный фильтр с полосой пропускания $\Delta F_{0,7} = 23$ кГц (рис.8,а).

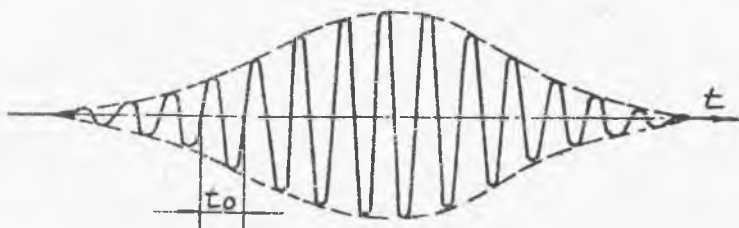
Третий нормированный сигнал используется для устранения многозначности и формируется из принимаемого

сигнала, прошедшего через линейную формирующую цепь, воздействие которой на радиоимпульс таково, что на переднем фронте огибающей образуется "характерная точка", где наблюдается скачок фазового сдвига частоты заполнения импульса на 180° , что эквивалентно двойному дифференцированию огибающей сигнала (рис. 8, в).

а) радиосигнал, прошедший фильтр с широкой полосой пропускания



б) радиосигнал, прошедший фильтр с узкой полосой пропускания



в) радиосигнал на выходе ФХТ

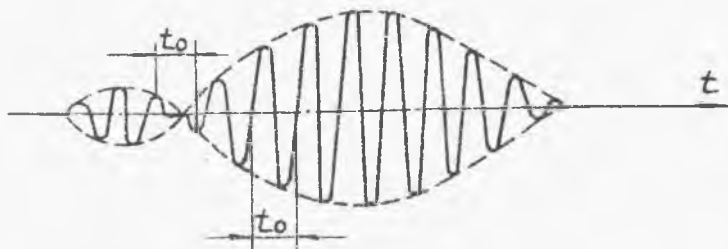


Рис. 8

Нормированный сигнал после ограничения используется для взятия проб фазы, которые преобразуются в цифровой двоичный код, содержащий информацию о разности фаз между опорными и принимаемыми сигналами.

Рассмотрим работу оборудования на борту в режиме Поиска (П), Устранения Многозначности (УМ) и Слежения за Фазой (СФ). Последовательность перехода с одного режима на другой определяется алгоритмом работы бортовой аппаратуры (рис. 9).

Задача поиска сигналов наземных станций сводится к задаче синхронизации поисковых опорных импульсов бортовой аппаратуры с принимаемым сигналом. Структурная схема устройства обнаружения представлена на рис. 10.

На два временных различителя (ВР) подается входной нормированный сигнал $u(t)$ и опорный от синхронизирующего устройства. Опорный сигнал, поступающий на один различитель, сдвинут относительно сигнала на второй различитель на четверть периода частоты заполнения. Из-за этого два канала обнаружения, в которых берутся пробы фазы, называются квадратурными, или "синусный" и "косинусный". С выходов ВР коды поступают на один вход дешифраторов (ДШ). На второй подается сигнал КОД ФМ (фазовой манипуляции), соответствующий фазовому коду принимаемого сигнала. Декодированные пробы фазы с выходов ДШ поступают на схемы совпадения, на которые подаются также стробы признаков полугрупп формата сигналов M_1 и M_2 длительностью 4000 мкс. С выходов схем совпадения результаты проб фазы в виде приращений поступают на соответствующие накопители (счетчики импульсов). По окончании времени накопления производится перемножение накопленных значений, а затем сложение произведений и сравнение результатов с заранее выбранной величиной (порогом). Если полученная величина окажется меньше порога, то схема сравнения выдает команду в устройство управления (УУ), что сигнал не обнаружен, а если больше порога, — то сигнал обнаружен.

В случае необнаружения входного сигнала опорный поисковый сигнал смещается в следующую точку временной диаграммы на шаг поиска и снова производится анализ. Так до тех пор, пока не будет выдана команда "Сигнал обнаружен" (рис. 11).

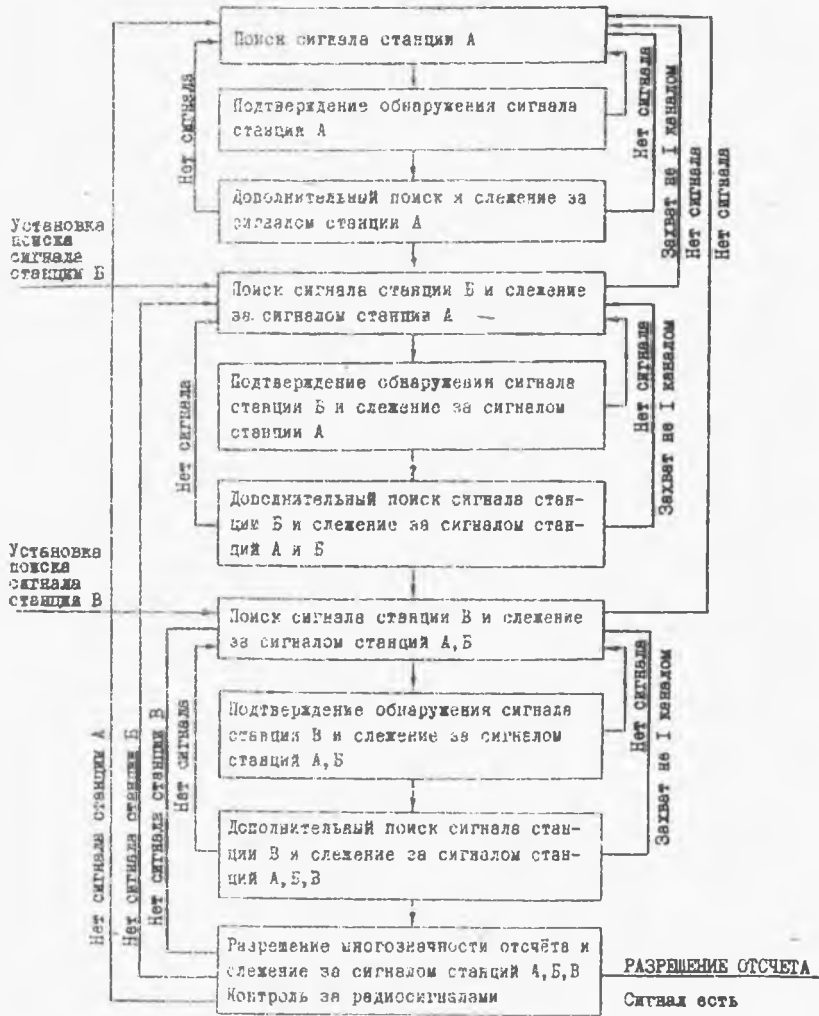


Рис. 9

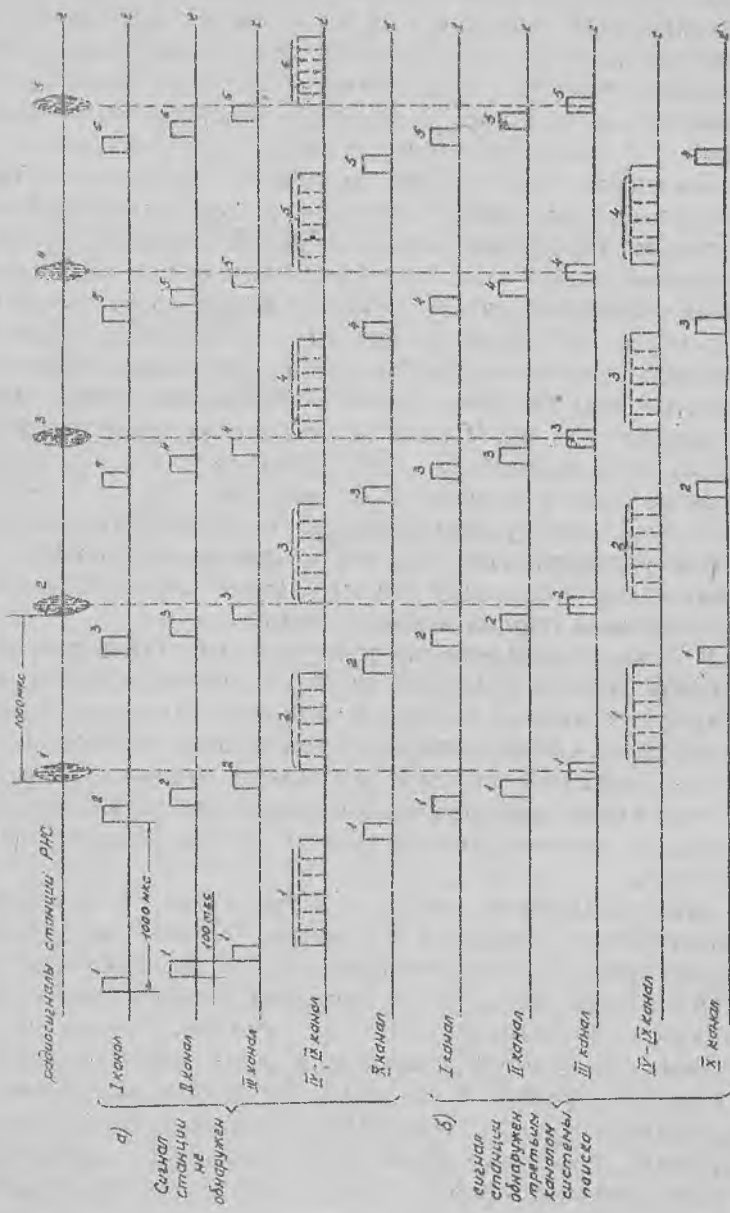


Рис. 11

Поскольку принятие решения о наличии сигнала носит вероятностный характер из-за наличия шумов, то для улучшения характеристик системы поиска вводится, в случае превышения порога, еще ступень подтверждения наличия сигнала в данной точке. В случае неподтверждения наличия сигнала УУ снова включает режим поиска станции А. При наличии сигнала производится включение следующего режима: "Дополнительный поиск" сигнала станции А, который имеет две ступени. При дополнительном поиске опорные импульсы, выдаваемые на ВР, смещены на 150 мкс влево от той точки, где был обнаружен сигнал, с целью выйти из тела сигнала и встать перед его передним фронтом, а в точку обнаружения установить стробы следящей системы, синхронно связанные с опорными импульсами. Режим "Дополнительный поиск" отличается от режима "Поиск" шагом поиска, временем анализа и пороговой величиной. Для "Дополнительного поиска" отводится участок времени в 200 мкс (рис. 12).

В случае обнаружения сигнала I ступени стробы следящей системы устанавливаются в эту новую точку сигнала, а УУ устанавливает следующий режим: "Поиск" сигнала станции Б, то есть сигнала первой ведомой станции.

В случае необнаружения дополнительным поиском сигнала на первой ступени следящие стробы сдвигаются вправо на 100 мкс и осуществляется вторая ступень дополнительного поиска. При обнаружении сигнала на второй ступени стробы следящей системы устанавливаются в эту новую точку сигнала, а УУ включает следующий режим. В случае необнаружения сигнала на второй ступени устанавливается режим "Поиск" сигнала станции А.

Для уменьшения времени обнаружения сигналов радионавигационной системы в режиме "Поиск" и "Дополнительный поиск" в бортовой аппаратуре используется десять параллельных каналов, в которых генерируются пачки импульсов длительностью 100 мкс в режиме "Поиск" и 10 мкс в режиме "Дополнительный поиск". Эти пачки формируются из стробов следящей системы на десяти выходных распределителях импульсов (РИ). Импульсами каналов обнаружения последовательно распределяются пробы фазы с выходов системы обнаружения по десяти каналам накопителя.

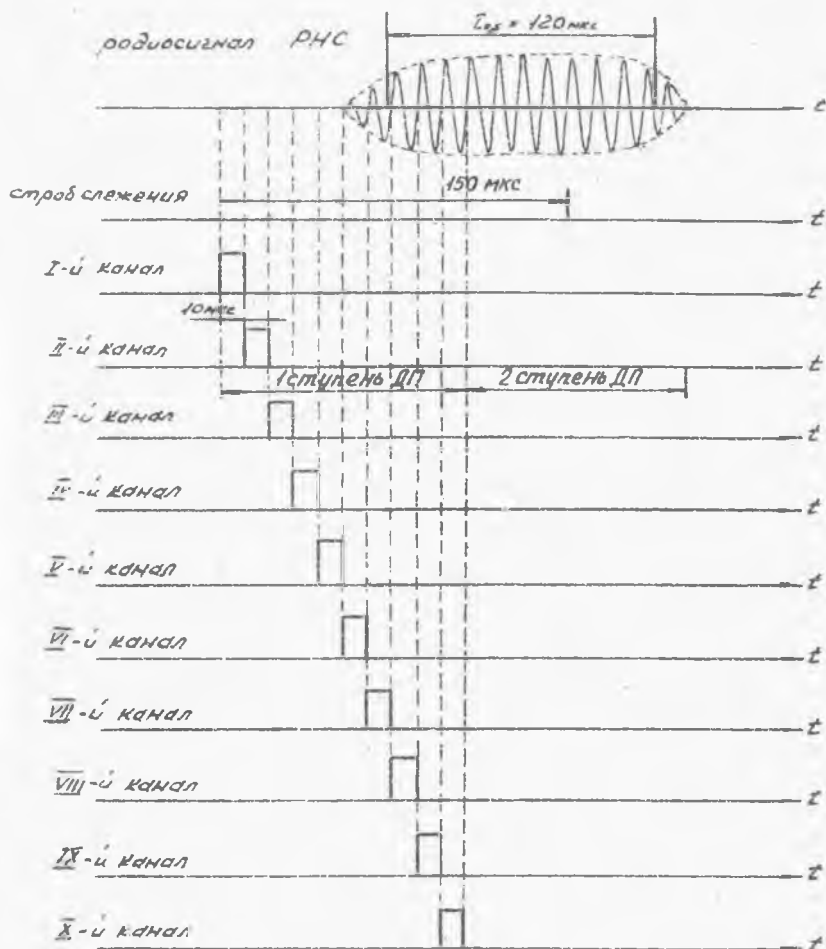


Рис. 12

Сигнал будет обнаружен, если все поисковые импульсы одного из десяти каналов совпадут со всеми импульсами сигнала наземных станций. При поиске сигнала ведомых станций на ВР подаются опорные импульсы и код ФМ соответственно с каналов Б и В синхронизирующего устройства, а вся процедура поиска остается той же, что и при "Поиске" и "Дополнительном

поиске” станции А. Переход из режима в режим УУ осуществляет согласно алгоритму. Время поиска сигналов ведомых станций существенно меньше времени поиска сигналов ведущей станции, так как поиск производится в пределах определенного временного интервала, называемого *зоной поиска* сигналов ведомой станции. После окончания дополнительного поиска сигналов ведомой станции В включается режим “Устранение многозначности”. Из описания режимов “Поиск” и “Дополнительный поиск” следует, что режим “Поиск” является грубым обнаружением сигнала, а “Дополнительный поиск” — точным, фиксирующим начало формата сигнала.

Режим “Устранение многозначности”. Устранение многозначности заключается в нахождении определенного периода высокочастотного заполнения радиоимпульсов и в установке стробов следящей системы для слежения за этим периодом. Одновременно с устранением многозначности осуществляется слежение за фазой сигнала, то есть за моментом перехода фазы колебаний высокой частоты заполнения через нулевой уровень. Как отмечалось ранее, с принимаемым сигналом производится операция, эквивалентная двойному дифференцированию. В результате на переднем фронте огибающей сигнала формируется точка, соответствующая моменту изменения фазы высокочастотного сигнала на 180° (Характерная Точка Огибающей — ХТО). В системе устранения многозначности имеется два канала накопления чисел: по раннему селекторному импульсу (РСИ) и позднему селекторному импульсу (ПСИ). Их взаимное расположение относительно радиосигнала, а также положение строба следящей системы показано на рис. 13.

Здесь же показано расположение стробов и селекторных импульсов в районе ХТО — “1”, а также справа — “3”, и слева — “2” относительно этой точки. Знаки приращений от РСИ и ПСИ, поступающие в накопители, обозначены соответственно “+” и “-”. Для системы устранения многозначности принят определенный алгоритм обработки принимаемого сигнала. Структурная схема устройства устранения многозначности показана на рис. 14.

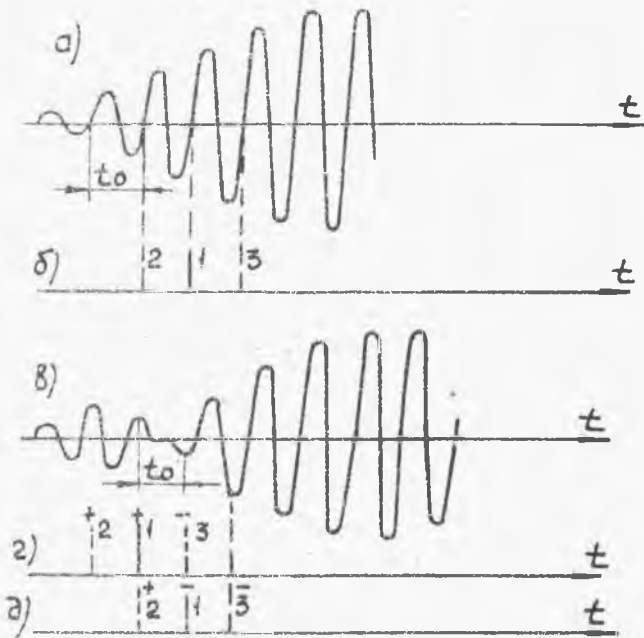


Рис. 13

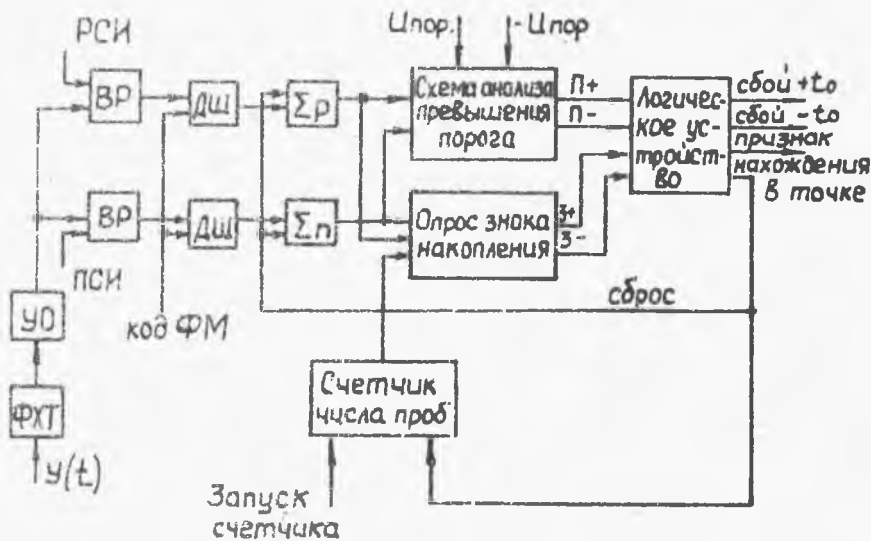


Рис. 14

Принятый сигнал $y(t)$, пройдя формирователь характерной точки (ФХТ) и усилитель-ограничитель (УО), поступает на два временных различителя (ВР), на которые подаются также селекторные импульсы РСИ и ПСИ. Выходные сигналы с ВР, пройдя ДШ, на которые поступает сигнал КОД ФМ, соответствующий коду фазовой манипуляции принимаемых сигналов, подается в виде приращения на входы накопителей Σ_p и Σ_n . В момент начала анализа запускается счетчик числа проб. В течение всего времени анализа схемой определения превышения порога непрерывно производится сравнение накопленного в накопителях значения с заранее установленной величиной порога $U_{пор}$. Выходной сигнал этой схемы (+П или -П) подается на логическое устройство, которое выдает сигнал для сбоя синхронизирующего устройства на $+t_0$ или $-t_0$ (период высокочастотного заполнения радиоимпульса), или же выдается признак того, что строб следящей системы установлен на требуемый период высокочастотного заполнения принимаемого сигнала, и, кроме того, с принятием определенного решения с логического устройства выдается сигнал на сброс накопителей и счетчика числа проб в исходное состояние.

В случае, если за число n проб, определяемое счетчиком числа проб, принять значение в накопителе, не превышающее значения $+U_{пор}$ или $-U_{пор}$, то принятие решения производится по знаку накопленных величин, поступающих со схемы опроса знака накопителя (+3 или -3), и затем производится сброс накопителей в исходное положение.

Режим автоматического слежения за фазой. В этом режиме обеспечивается подстройка фазы опорного сигнала с фазой высокочастотного заполнения принимаемых сигналов. Этот режим включается в момент перехода из режима "Поиск" в режим "Дополнительный поиск". Структурная схема следящей системы показана на рис. 15.

Принимаемый нормированный сигнал $y(t)$ поступает на усилитель-ограничитель (УО) и затем подается на вход временного различителя (ВР). При совпадении строба следящей системы с положительным или отрицательным уровнем сигнала выходной сигнал ВР принимает значение $+1$ или -1 в зависимости от разности фаз между принимаемым и опорным сигналами на входе ВР.

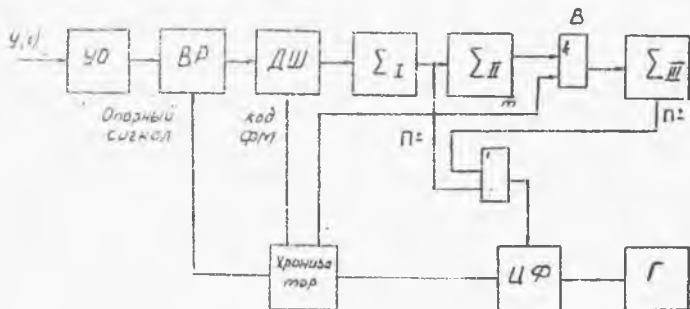


Рис. 15

Дешифратор ДШ производит декодирование принятого сигнала в соответствии с кодом фазовой манипуляции сигналов станций радионавигационной системы. Код соответствующей разности фаз между опорным и принятым сигналом поступает в виде приращений на вход накопителя ΣI . В случае переполнения накопителя ΣI от положительных или отрицательных приращений с него снимается сигнал $\Pi+$, соответствующий $+1$, или $\Pi-$, соответствующий -1 , который поступает через схему "ИЛИ" на управление цифровым фазовращателем (ЦФ) для сбоя опорных сигналов на 0.1 мкс.

Кроме того, сигналы $\Pi+$ и $\Pi-$ подаются в виде приращений на вход накопителя ΣII (реверсивного счетчика). Величина, накопленная в ΣII , $m = 8$ раз за период следования T сигналов станций радионавигационной системы суммируются в накапливающем сумматоре ΣIII , поступая на его вход через вентиль B . Переполнение ΣIII также подается на вход ЦФ для сбоя опорных импульсов на 0.1 мкс.

Такая схема цифровой следящей системы эквивалентна схеме следящей системы с астатизмом второго порядка, то есть ошибка по скорости в такой системе отсутствует. Число, пропорциональное установившейся скорости изменения разности фаз между сигналами радионавигационной системы и опорным, соответствует скорости движения ЛА и хранится в накопителе ΣII , а с выхода накопителя ΣIII число управляющих импульсов, поступающих на ЦФ, будет пропорционально этой скорости. Таким образом ЦФ, компенсируя разность фаз, будет следить за скоростью ЛА.

При переходе в режим устранения многозначности система обнаружения ЛА приводится в режим контроля за наличием сигналов станций системы. В случае необнаружения сигналов какой-либо станции в течение времени, равного 1024 T (от 51 до 102 с. в зависимости от частоты повторения), включается режим "Поиск" по соответствующему каналу.

Измерение временных интервалов между радиоимпульсами ведущей и ведомой станций производится с помощью отсчетного устройства. После устранения многозначности по всем трем каналам (А, Б, В) временные интервалы между опорными сигналами на временном разделителе (ВР) следящей системы и между радиоимпульсами станций радионавигационной системы будут равны.

Структурная схема отсчетного устройства и устройства индикации приведены на рис. 16.

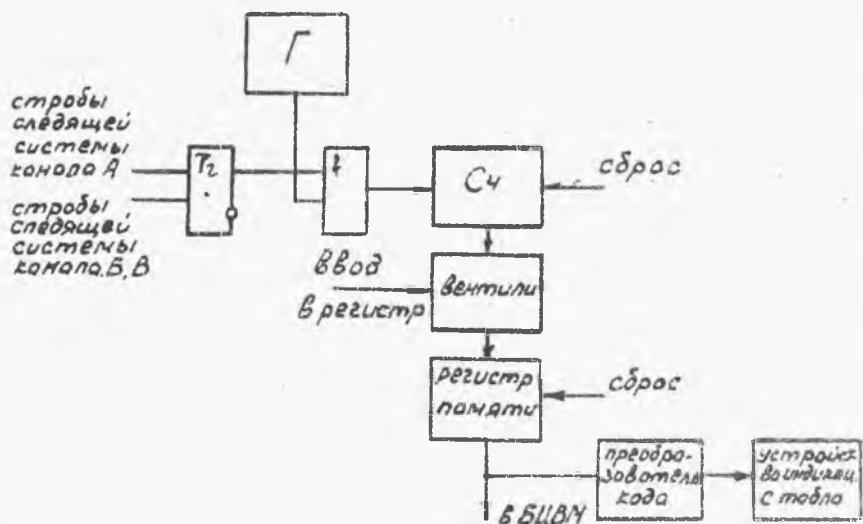


Рис. 16

Триггер T_r формирует селекторный импульс длительностью, равной временному расстоянию между стробами следящих систем ведущего и ведомого каналов, причем стробы ведомых каналов Б и В поступают на запуск триггеров с периодом следования 2λ сигналов станций. На выходе схемы "И" формируется последовательный код временного расстояния между стробами следящих систем канала А и канала Б (В). В качестве меры времени используется высокочастотный генератор Г. Последовательный код с помощью счетчика преобразуется в параллельный, который через вентили переписывается в параллельный регистр памяти на хранение. Из параллельного регистра код выдается в бортовую ЦВМ и на преобразователь кода, который преобразует параллельный двоичный код в двоично-десятичный и, кроме того, там же осуществляется вычитание кодовых задержек t_k из измеренных временных интервалов. Результат измерения в виде двоично-десятичного кода с преобразователя кода поступает в устройство индикации, работающее на табло пульта (П-3).

Кроме описанных устройств, в состав бортовой аппаратуры входит устройство встроенного контроля, необходимое для проверки его работоспособности. Режим "Контроль" может быть задан как с пульта управления, так и с БЦВМ. Устройство встроенного контроля формирует сигналы, имитирующие сигналы станций радионавигационной системы. Структурная схема показана на рис. 17.

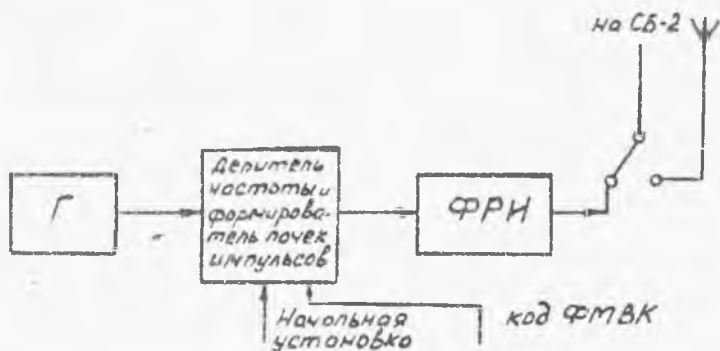


Рис. 17

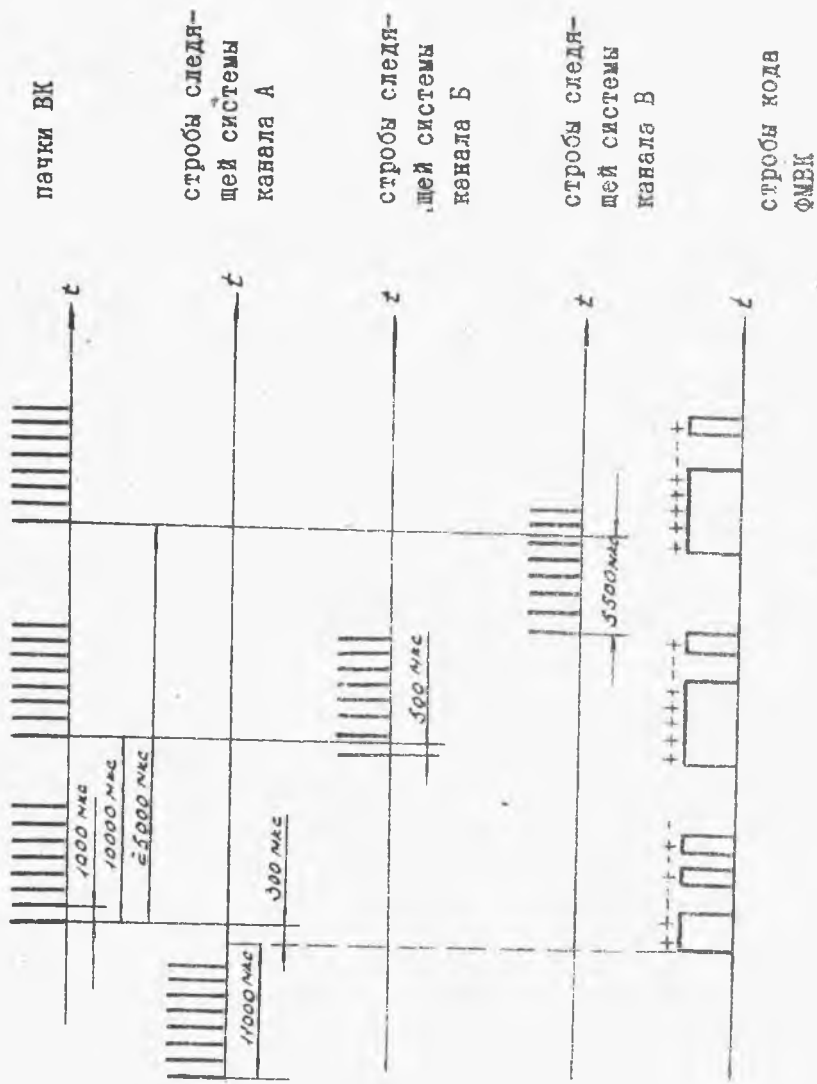


Рис. 18

От высокочастотного генератора запускается делитель частоты, с помощью которого формируются три пачки видеоимпульсов по восемь импульсов в каждой пачке, соответственно для каналов А, Б, В с фиксированным расстоянием между пачками. Видеоимпульсы подаются на запуск формирователей радиоимпульсов. Для кодирования радиоимпульсов по фазе в формирователь пачек импульсов поступают стробы фазовой модуляции. Для уменьшения времени контроля (за счет уменьшения времени обнаружения сигналов) производится начальная установка делителя частоты встроенного контроля относительно поисковых стробов каналов А, Б, В (рис. 18). После проверки всех систем и установления слежения за сигналами система встроенного контроля на табло устройства индикации должна высветить фиксированные значения временных интервалов: $\Delta t_{AB} = 10000 \pm 1$ мкс; $\Delta t_{AB} = 25000 \pm 1$ мкс, что свидетельствует об исправности системы. Амплитуда сигнала встроенного контроля равна 30 мкВ, что позволяет проверять изделие в условиях, близких к реальной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая точность определения разностно-дальномерных параметров в импульсно-фазовой радионавигационной системе (ИФРНС) обеспечивается путем измерения разности фаз между высокочастотным заполнением радиоимпульсов ведущей и ведомой станций.

В бортовой приемоиндикационной аппаратуре ИФРНС осуществляется слежение за временем положения радиоимпульсов станций А, Б, В, что позволяет проводить измерение временных интервалов t_{AB} и t_{AB} , которые определяют разностно-дальномерные линии положения.

Слежение производится как за характерной точкой огибающей (ХТО), расположенной на переднем фронте радиоимпульса, так и за фазой высокочастотного заполнения радиоимпульсов несущей частотой.

Устранение многозначности фазовых отсчетов осуществляется путем совместной обработки этих изменений.

Для определения координат места ЛА и навигационных параметров полета при работе по сигналам фазовой и импульсно-фазовой радионавигационных систем в состав бортового навигационно-пилотажного комплекса входит ЦВМ 20-13.

СОДЕРЖАНИЕ

В в е д е н и е	3
1. Термины и определения.....	5
2. Назначение и типы систем дальней навигации.....	7
3. Фазовые радионавигационные системы.....	9
4. Импульсно-фазовые радионавигационные системы.....	17

Учебное издание

Данилин Александр Иванович,
Коптев Анатолий Никитович,
Кузьмичев Николай Александрович

РАДИОСИСТЕМЫ ДАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т и н и ц а
Техн. редактор Г. А. У с а ч е в а
Корректор Т. И. Щ е л о к о в а

Лицензия ИР № 020301 от 30.12.96.
Подписано в печать 20.06.97. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,1, Усл. кр.-отг. 2,22, Уч.-изд. л. 2,25,
Тираж 200 экз. Арг. С — 7/97. Заказ 126.

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С. П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

ИПО Самарского государственного аэрокосмического
университета им. академика С. П. Королева.
443001 Самара ул. Молодогвардейская, 151