

Виды радионавигационных систем

Радионавигационной системой называют совокупность устройств, предназначенных для местоопределения и управления движением объектами на основе информации, содержащейся в принимаемых радиоволнах.

Геометрические или механические величины (скорость, ускорение), которые характеризуют положение и перемещение объекта, называют навигационными элементами (НЭ) и обозначают буквой W .

Местоположение объекта характеризуется положением центра масс этого объекта в некоторой опорной системе координат. Выбор опорной системы координат зависит от используемой РНС. В радионавигации применяют местные и глобальные системы координат.

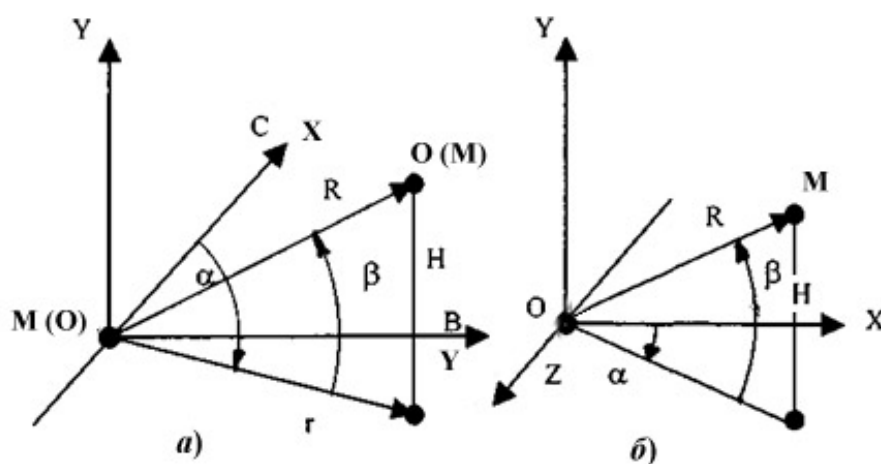


Рис.1.1 Местные сферические системы координат:
а) неподвижная, б) связанная с подвижным объектом

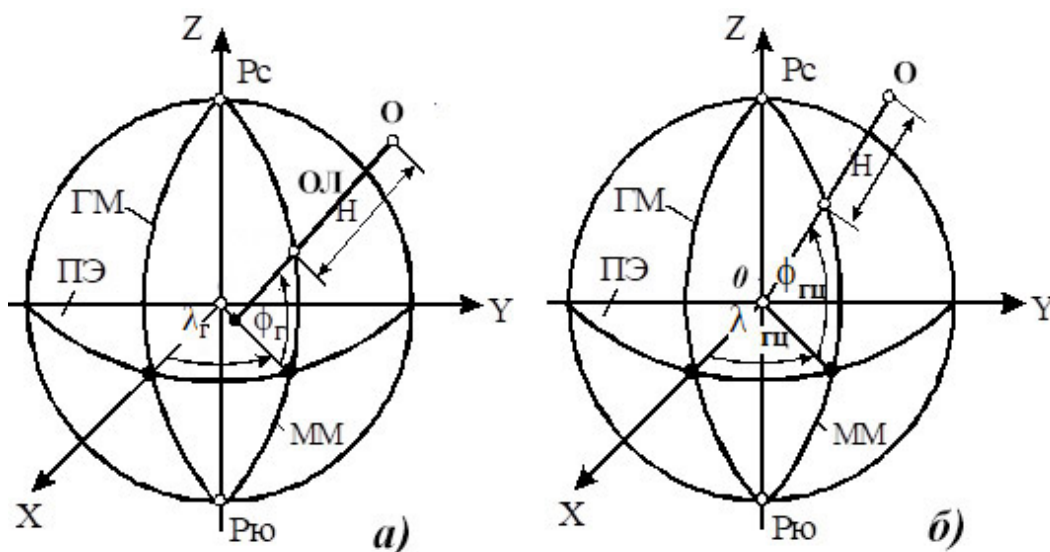


Рис.1.2 Глобальные системы координат:
а) географическая, б) геоцентрическая

Место РНС в системе управления объектом (ЛА)

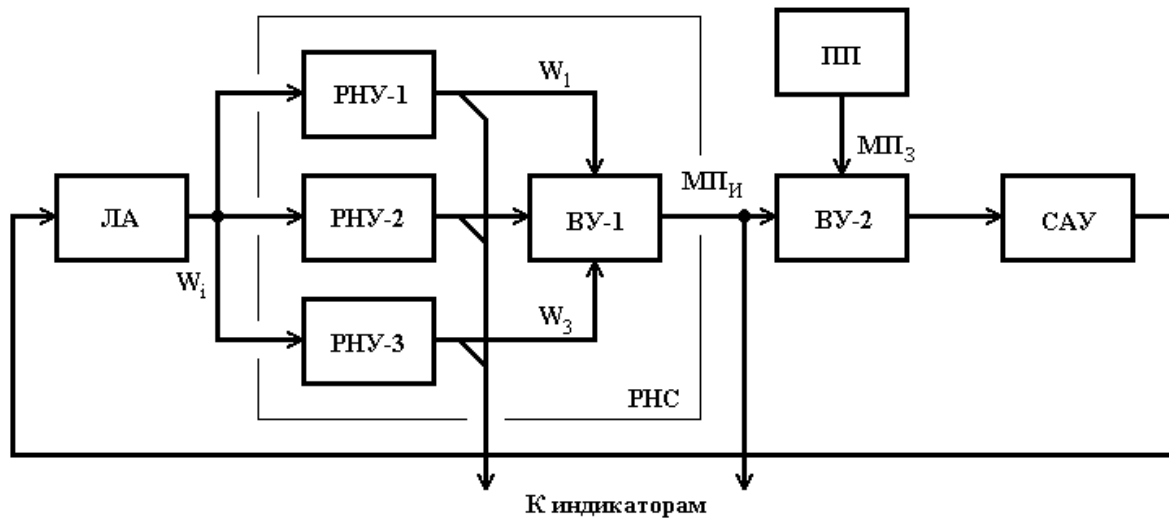


Рис.1.3 Функциональная схема управления полетом. РНУ – радионавигационные устройства, ВУ – вычислительные устройства, САУ – система автоматического управления

Задачи, решаемые РНУ:

- обнаружить (захватить) сигнал маяка путем последовательного или параллельного поиска по неизвестным параметрам этого сигнала,
- получить уточненное значение информативного параметра ν с помощью следящего или неследящего измерителя,
- вычислить величину геометрического элемента W .

Связь информативного параметра сигнала ν и геометрического элемента W

$$W = M_{\nu} \nu$$

где M_{ν} – масштабный коэффициент, имеющий размерность единицы W , деленной на единицу ν . Информативным параметром может быть как время прихода, частота, начальная фаза или амплитуда сигнала, так и направление прихода сигнала (два угла в пространстве) и параметры поляризации поля.

Методы определения местоположения в РНС

Различают три метода определения местоположения объекта: счисления пути, позиционный и обзорно-сравнительный.

Метод счисления пути основан на интегрировании по времени измеренного вектора скорости ЛА относительно поверхности Земли (рис. 1.4,а).

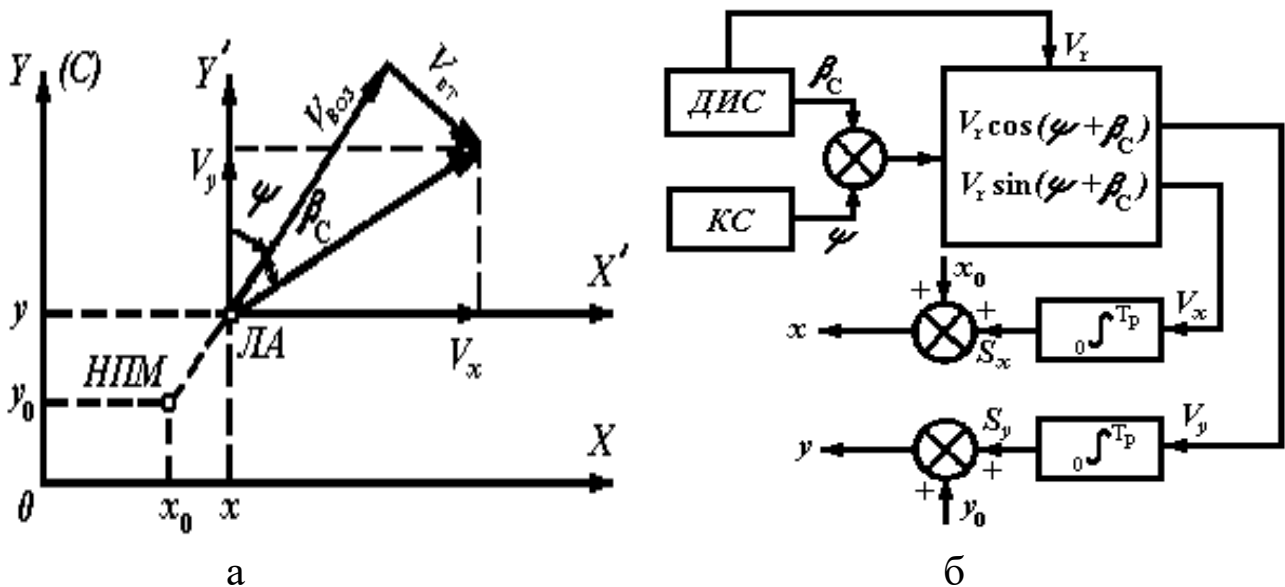


Рис.1.4 Составляющие вектора скорости ЛА (а) и функциональная схема системы счисления пути (б)

В качестве датчика системы счисления применяют доплеровский измеритель скорости (ДИС) или инерциальный датчик ускорения. С помощью ДИС обычно измеряют модуль вектора скорости V_r в горизонтальном полете (путевая скорость), представляющий собой сумму векторов воздушной скорости $V_{воз}$ и скорости ветра $V_{вт}$, и угол сноса β_c , т.е. угол между продольной осью ЛА и направлением вектора V_r .

Вычислительное устройство определяет продольную V_x и поперечную V_y составляющие вектора V_r и рассчитывает текущее местоположение ЛА. Доплеровский измеритель определяет направление вектора относительно продольной оси ЛА. Для нахождения направления полета по отношению к поверхности Земли необходимо знать курс ЛА ψ , информация о котором поступает от курсовой системы КС.

Позиционный метод основан на использовании *поверхностей или линий положения* для определения местоположения объекта. Поверхность положения представляет собой геометрическое место точек в пространстве, соответствующих одному значению W , т.е. одному значению дальности, угла и т.п. Местоположение объекта находят как точку пересечения трех поверхностей положения (ПП). В местной системе координат (рис.1.5,а) в предположении, что объект расположен в точке М такими поверхностями положения обычно являются ПП₁ ($W_1=R=const$), ПП₂ ($W_2=\alpha=const$) и ПП₃ ($W_3=H=const$).

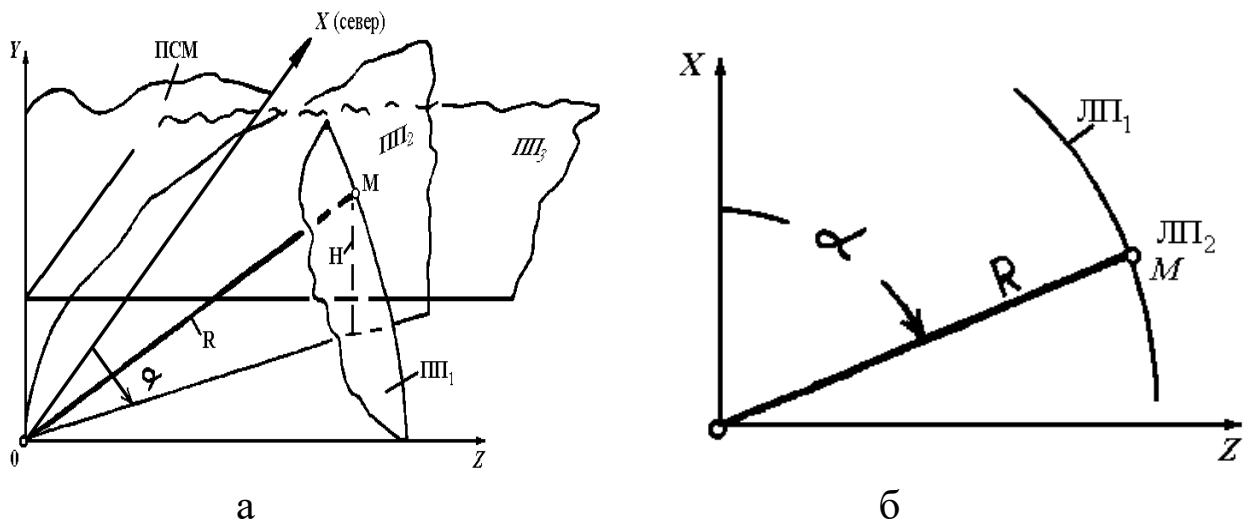


Рис.1.5 Поверхности (а) и линии (б) положения при определении местоположения объекта позиционным методом

В позиционных РНС измеряют элементы W , характеризующие положение ЛА относительно стационарных или подвижных опорных передающих или приемопередающих радиостанций (маяков), расположенных в РНТ – радионавигационных точках с известными координатами (или на известных траекториях).

Навигационные элементы W , измеряемые в позиционных РНС, относятся к набору из 6 величин, измерение которых можно выполнить радиотехническими методами:

- 1) дальность, в том числе, псевдодальность,
- 2) разность дальностей до двух источников сигнала,
- 3) сумма дальностей,
- 4) пеленг,
- 5) обратный пеленг,
- 6) разность пеленгов.

Линиями положения для перечисленных величин являются соответственно:

- 1) окружность,
- 2) гипербола,
- 3) эллипс,
- 4) луч из точки расположения потребителя,
- 5) луч из точки расположения маяка,
- 6) дуга окружности.

Обзорно-сравнительный (корреляционно-экстремальный) метод основан на определении каких-либо характеристик местности, над которой движется ЛА, или характеристик геофизических полей Земли и сравнении их с соответствующими характеристиками, заложенными в память системы.

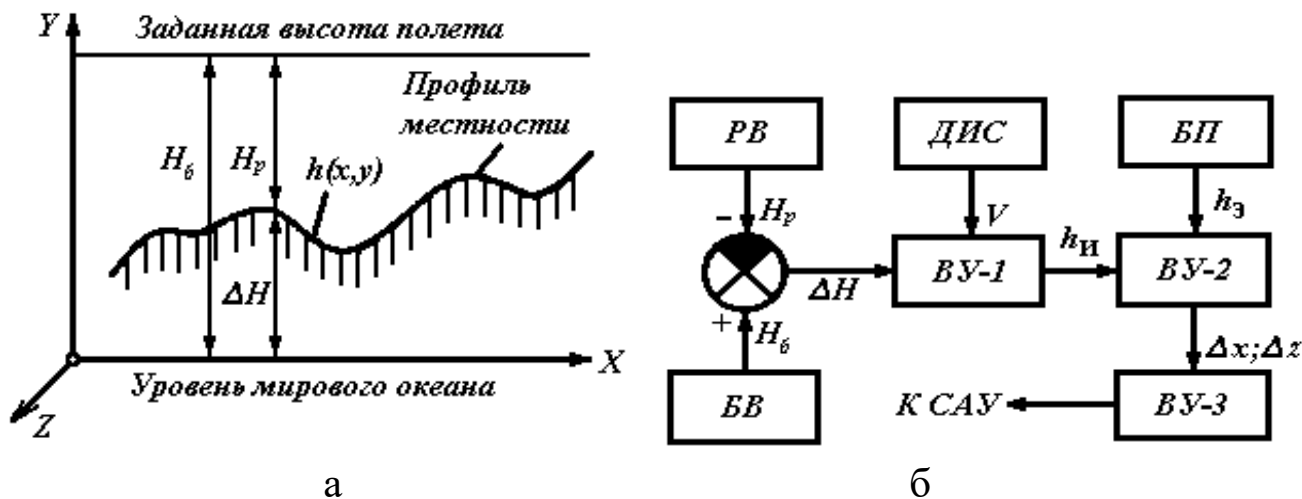


Рис.1.6 Геометрические элементы (а), используемые в обзорно-сравнительной системе, и структурная схема системы (б): БВ – барометрический высотомер; ДИС – доплеровский измеритель скорости.

Классификация радионавигационных устройств и систем

Основными классификационными признаками радионавигационных устройств и систем являются *назначение; характер источника информативного сигнала; вид определяемого навигационного элемента W; вид информативного параметра сигнала v и степень автономности.*

Назначение характеризует класс навигационных задач, для решения которых служит РНС. В соответствии с назначением различают радиосистемы глобальной, дальней и ближней навигации, посадки, сближения и стыковки ЛА и предупреждения столкновений движущихся объектов.

Глобальные РНС строятся на основе спутниковых РНС (СРНС) и предназначены для высокоточного определения МП (позиционирования) в любой точке земной поверхности или околоземного пространства, т.е. обеспечивают обычно глобальную зону действия. Эти системы работают в диапазоне дециметровых радиоволн и представляют собой пассивные многопозиционные РНС, в которых МП рассчитывается по результатам определения дальностей до РНТ. За РНТ принимают точки расположения навигационных искусственных спутников Земли на орбитах в момент измерений.

Радиосистемы дальней навигации (РСДН) предназначены для определения МП на расстояниях, превышающих дальность прямой видимости. Системы дальней навигации работают на километровых (длинных) и мириаметровых

(сверхдлинных) волнах и представляют собой пассивные многопозиционные фазовые РНС. В этих системах МП рассчитывают по дальностям или разностям дальностей до наземных опорных станций, дальность действия которых составляет несколько тысяч километров. Для определения МП в дальномерных РСДН необходимо не менее двух опорных станций, а в разностно-дальномерных – не менее двух пар таких станций.

Радиосистемы ближней навигации (РСБН) в основном служат для определения МП в зоне прямой видимости наземных опорных станций (радиомаяков), работающих в дециметровом диапазоне волн. Местоположение объекта рассчитывается по определенным на нем азимуту опорной станции и дальности до той же станции (однопозиционная РНС). Для нахождения этих навигационных элементов в РСБН имеются два независимых канала (каналы азимута и дальности). Используемый в РСБН метод определения МП – комбинированный и называется угломерно-дальномерным (азимутально-дальномерным).

Системы посадки (СП) самолетов и вертолетов предназначены для получения на борту ЛА информации об угловых отклонениях $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ ЛА от заданной траектории снижения. Для таких СП выделены участки частот в диапазонах метровых и сантиметровых радиоволн. Сантиметровые СП используются также для посадки многоразовых космических аппаратов. Для посадки последних на необорудованные площадки служат бортовые системы, контролирующие высоту и скорость снижения космического аппарата, работающие в сантиметровом диапазоне.

Системы сближения и стыковки (причаливания) предназначены для получения информации о взаимном положении, радиальной скорости и дальности сближающихся объектов на этапе от начала сближения до стыковки. Соответствующие системы функционируют в диапазоне сантиметровых радиоволн или в оптическом диапазоне. В частном случае межсамолетной навигации для решения части из этих задач используются варианты РСБН.

Системы предупреждения столкновений (СПС) служат для выдачи экипажу движущегося объекта сигнала об опасном сближении самолетов в воздухе, морских кораблей или автомобилей и команд на выполнение безопасного маневра по расхождению конфликтующих объектов. В основе авиационных СПС лежит, например, автоматический обмен информацией о высоте и скорости взаимодействующих ЛА и определение расстояния между ними.

Характер источника информативного сигнала влияет на структуру РНС и в зависимости от источника принимаемого и обрабатываемого в РНУ сигнала различают активные, активные с активным ответом, пассивные и многопозиционные устройства и системы.

Активные устройства и системы извлекают информацию из отраженных от земной поверхности сигналов, т.е. основаны на принципах радиолокации.

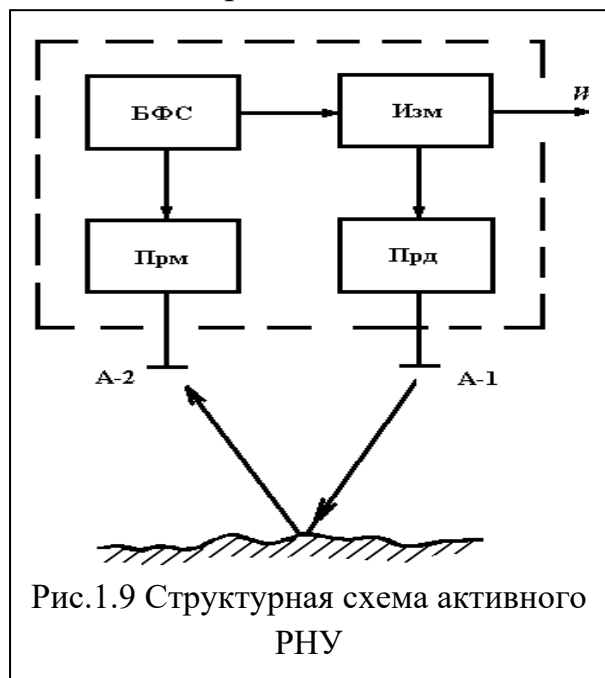


Рис.1.9 Структурная схема активного РНУ

Отличительным признаком таких РНУ является наличие передатчика на определяющем свое местоположение объекте О (рис.1.9).

Вырабатываемый блоком формирования БФС сигнал усиливается и (при необходимости) преобразуется в передатчике Прд, сигнал которого поступает на передающую антенну А-1 и излучается в сторону земной поверхности. Отраженный от этой поверхности сигнал принимается антенной А-2, поступает на приемник Прм, а затем – на измеритель Изм, где он сравнивается с сигналом, полученным от БФС.

Активные устройства и системы с активным ответом извлекают информацию

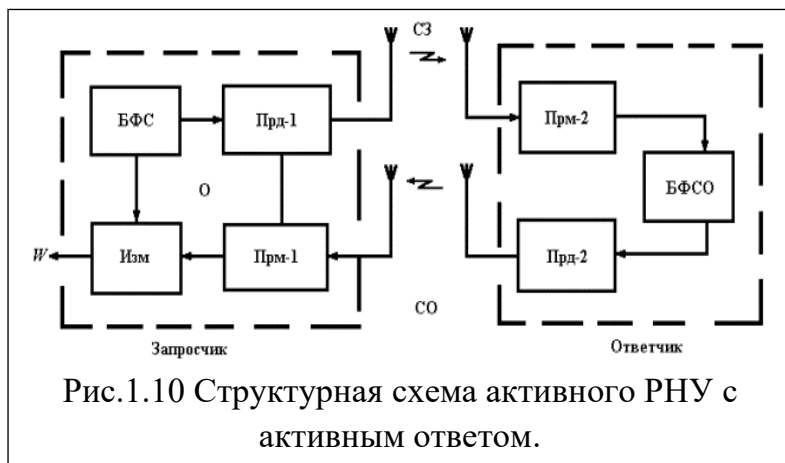


Рис.1.10 Структурная схема активного РНУ с активным ответом.

из собственного сигнала, ретранслированного внешним по отношению к определяющему свое МП объекту О устройством (ответчиком), т.е. реализуют принцип “запрос–ответ” (рис.1.10).

Схема построения запросчика аналогична рассмотренной

выше схеме активного РНУ, только формируемый в ней сигнал называют сигналом запроса СЗ. Ответчик представляет собой приемопередатчик, отличающийся тем, что в его состав включен блок формирования сигнала ответа БФСО. Наличие ответчика позволяет увеличить мощность принимаемого Прм-1 сигнала по сравнению с обычной активной системой. Поэтому дальность действия рассматриваемых РНУ ограничивается не мощностью передатчика объекта Прд-1, а дальностью прямой видимости. С целью повышения помехоустойчивости сигналы запроса и ответа обычно кодируются. Кроме того, по линии запросчик–

ответчик можно передавать дополнительную информацию. Однако системам с активным ответом свойственно ограничение пропускной способности, что связано с перегрузкой передатчика Прд-2 ответчика.

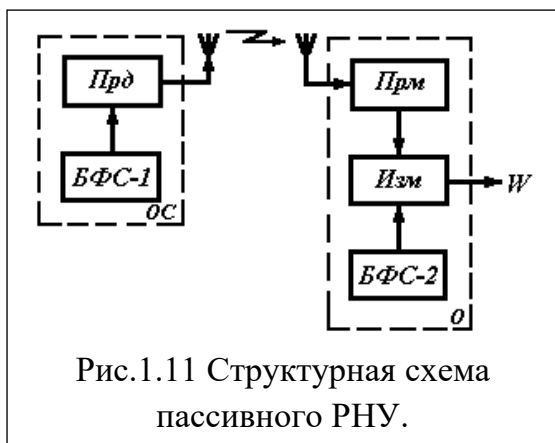


Рис.1.11 Структурная схема пассивного РНУ.

пассивных РНУ является сложность измерения информативного параметра сигнала, так как для этого необходимо, чтобы БФС-2 вырабатывал точную копию сигнала, формируемого на ОС блоком БФС-1.

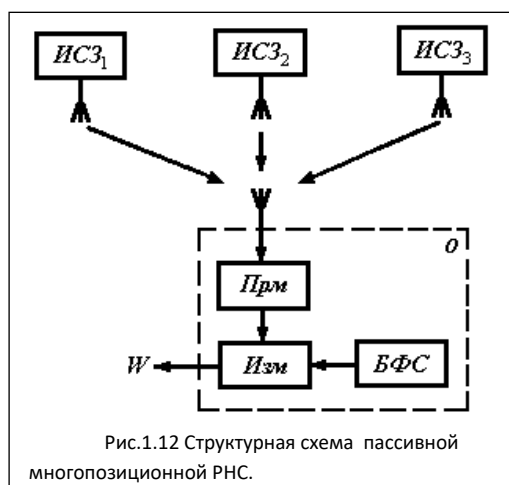


Рис.1.12 Структурная схема пассивной многопозиционной РНС.

Многопозиционные РНС обладают рядом достоинств по сравнению с обычными (однопозиционными). Так избыточность информации позволяет повысить точность системы, а рациональное размещение ОС – увеличить ее рабочую область (зону действия).

Вид навигационного параметра W влияет на форму поверхностей и линий положения, т.е. на геометрические особенности РНУ и РНС, от которых зависит точность определения МП. В зависимости от вида W различают угломерные, дальномерные, разностно-дальномерные РНУ и измерители скорости.

Вид информативного параметра сигнала v определяет структуру и потенциальную точность РНУ. Последнее утверждение следует из вытекающего из (1.1) при $M_v = const$ соотношения

$$\sigma_W = M_v \sigma_v, \quad (1.2)$$

где σ_W и σ_v – СКП определения W и измерения v соответственно.

В зависимости от того, какой параметр принимаемого на РНУ сигнала информативный, т.е. связан с W соотношением (1.1), различают амплитудные, частотные, временные и фазовые РНУ. Такие же названия носят и соответствующие методы определения W . Заключенная в v информация выделяется обычно при сравнении принятого сигнала с опорным.

Амплитудные РНУ определяют W по результатам измерения амплитуды U_m принимаемого сигнала ($v = U_m$) или связанного с ней коэффициента глубины амплитудной модуляции m этого сигнала ($v = m$). Амплитуда принимаемого сигнала зависит не только от W , но и от многочисленных факторов, учесть которые практически невозможно. Поэтому область применения амплитудных РНУ ограничивается определением угловых координат, где при соответствующем построении РНУ (например, при измерении m) влияние мешающих факторов может быть сведено к приемлемому минимуму.

Обязательный элемент амплитудных угломерных РНУ – одна или несколько направленных антенн, с помощью которых формируется сигнал с амплитудой $U_m(\theta_p)$, зависящей от угла рассогласования θ_p между осью симметрии диаграммы направленности и направлением передатчик–приемник. В таких РНУ навигационный элемент $W = \theta_p$. Искомая координата (α или β) может отсчитываться по углу поворота антенны или ее ДН, при котором $\theta_p = 0$.

Специфическими факторами, влияющими на точность амплитудных РНУ являются крутизна диаграммы направленности антенн РНУ при $\theta_p = 0$ и наличие сигналов, отраженных от находящихся вблизи от РНУ местных объектов.

Частотные РНУ определяют W по результатам измерения разности частот F_p излучаемого и принимаемого отраженного от земной поверхности сигналов ($v = F_p$) и применяются в основном для измерения высоты полета и скорости ЛА. Эти РНУ относятся к классу активных устройств и работают в режиме непрерывного излучения зондирующего сигнала. Опорным сигналом служат излучаемые колебания, стабильность частоты которых должна быть такой, чтобы уход их частоты за время прохождения сигнала от ЛА до земной поверхности и обратно был существенно меньше измеряемого сдвига частот F_p .

Специфическими факторами, ограничивающими точность частотных РНУ, являются влияние просачивающегося в приемный тракт сигнала передатчика (следствие применения режима непрерывного излучения) и случайный характер отраженного от земной поверхности сигнала (следствие многоточечного характера отражающей поверхности). Первый из этих факторов приводит к увеличению

коэффициента шума приемника, а второй к погрешностям, зависящим от ширины диаграммы направленности антенн РНУ и от вида отражающей поверхности.

Временные РНУ определяют W по результатам измерения интервала времени Δt между двумя сигналами ($v=\Delta t$). В большинстве временных РНУ используют простые импульсные сигналы (*импульсные РНУ*), которые применяются в дальномерных, разностно-дальномерных и угломерных системах. В дальномерных РНУ, относящихся к классу активных устройств с активным ответом, измеряется время задержки импульса сигнала ответа относительно импульса сигнала запроса. В разностно-дальномерных и угломерных РНУ импульсы, интервал Δt между которыми измеряется на объекте, формируются с помощью аппаратуры опорных станций (обычно наземных), т.е. аппаратура определяющего свое МП объекта работает в пассивном режиме.

Фазовые РНУ определяют W по результатам измерения разности фаз $\Delta\phi$ двух сигналов ($v=\Delta\phi$), работают в пассивном режиме и применяются при определении дальности, разности дальностей и угловых координат. В фазовых дальномерных и разностно-дальномерных РНУ требуются бортовые опорные эталонные генераторы с высокой стабильностью частоты, с фазой сигнала которых производится сравнение фазы принимаемого сигнала. В фазовых угломерных РНУ измеряется разность фаз $\Delta\phi$ между двумя принимаемыми сигналами, один из которых опорный. Оба сигнала формируются аппаратурой наземного радиомаяка.

Точность фазовых РНУ тем выше, чем больше частота сигнала, на которой производится сравнение фаз. Однако при увеличении этой частоты сокращается зона однозначного определения W , поскольку судить о W можно только при $\Delta\phi \leq 2\pi$. Противоречие между требуемой точностью и однозначностью определения W характерно для всех фазовых РНУ.

Степень автономности определяет возможность использования РНУ или РНС для навигации на трассах, не обслуживаемых наземными или спутниковыми средствами. Различают автономные и неавтономные РНУ и РНС.

Автономные устройства и системы определяют W без помощи радиолинии, связывающей бортовую аппаратуру данного объекта с внешними по отношению к нему радиоэлектронными устройствами. В таких РНУ (РНС) реализуется радиолокационный принцип, т.е. информация о W извлекается из отраженного от земной поверхности сигнала. К этому классу относятся частотные РНУ, системы счисления пути и обзорно-сравнительные системы.

Неавтономные устройства и системы имеют в своем составе как бортовую аппаратуру, установленную на определяющем свое МП объекте, так и связанную с ней радиолинией аппаратуру специальных радиостанций, размещенных на наземных пунктах, искусственных спутниках Земли или других объектах. К неавтономным относятся все позиционные РНУ и РНС.

Тактические и технические параметры РНУ и РНС

Тактические параметры. Тактические параметры зависят от назначения РНУ или РНС и характеризуют их возможности. Основными для большинства РНУ (РНС) тактическими параметрами являются: точность; рабочая зона (область) и дальность действия; пропускная способность; быстродействие; надежность; помехоустойчивость; эксплуатационная эффективность.

Точность отражает близость результатов измерений к истинному значению измеряемой величины. Характеристикой точности РНС в целом является погрешность определения местоположения объекта. Различают систематические и случайные погрешности.

Систематические погрешности обусловлены известными и закономерными факторами, поэтому их можно оценить расчетным путем или экспериментально и, следовательно, либо устранить, либо учесть при измерениях. Обычно под результатом измерения понимают величину, свободную от систематической погрешности.

Случайные погрешности вызываются большим числом факторов, не поддающихся точному учету и действующих в каждом отдельном измерении различным образом. Обычно считают, что случайные погрешности измерений x распределены по гауссовскому закону.

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

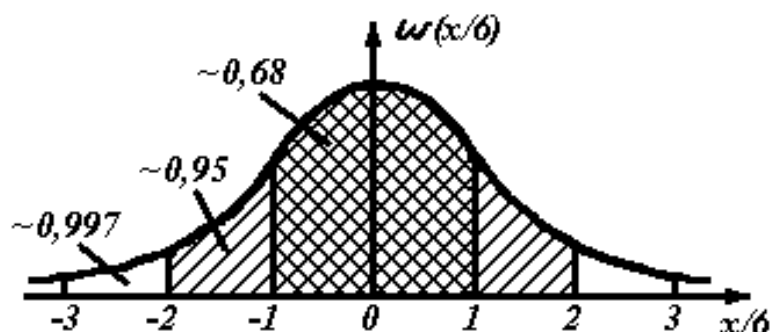


Рис.1.7 Плотность распределения вероятностей случайных погрешностей измерений

За меру точности принимают среднюю квадратическую погрешность σ или срединную (вероятную) погрешность χ .

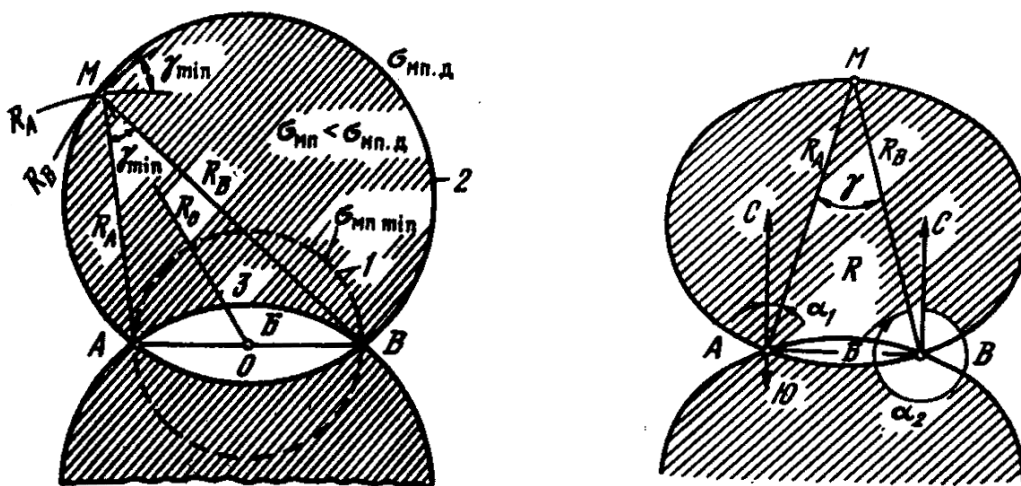
Средняя квадратическая погрешность (СКП) или *Средняя квадратическая ошибка (СКО или RMS)* – корень квадратный из дисперсии результатов измерений. Вероятность того, что погрешность измерений не превысит σ при гауссовском законе $w(x)$, равна 0,683.

В международной практике часто используют удвоенную среднюю квадратическую погрешность 2σ (*2DRMS*). При этом 95% всех измерений имеют погрешность, не превышающую 2σ . Для систем повышенной точности обычно

применяют *максимальную погрешность*, равную 3σ (99,7% всех измерений имеют погрешность не более 3σ).

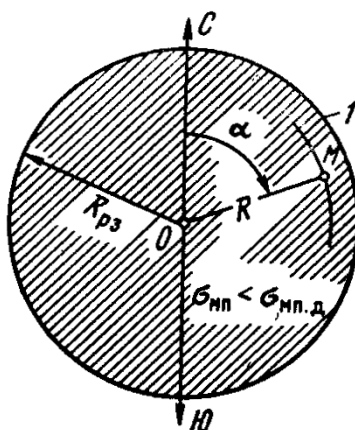
Срединная или вероятная погрешность связана со средней квадратической погрешностью при гауссовском распределении погрешностей соотношением $\chi=0,67449\sigma$. Вероятность того, что погрешность измерения по абсолютной величине будет меньше χ , равна 0,5. При оценке точности определения местоположения используется величина *кругового вероятного отклонения* (КВО или CEP – circular error probable) – радиус круга, в который в среднем попадает 50% измерений.

Рабочая зона (область) – область пространства, в пределах которой погрешность $\sigma_{мп}$ нахождения местоположения с помощью РНС с известной вероятностью не превышает заданную σ_3 . При решении навигационных задач на плоскости понятию рабочая область соответствует рабочая зона РНС (рис.1.8).



Рабочая зона дальномерной системы

Рабочая зона угломерной системы



Рабочая зона дальномерно-угломерной системы

Рис. 1.8. Рабочие зоны РНС

Пропускная способность является мерой способности РНУ или РНС обеспечивать радионавигационной информацией определенное число объектов навигации (ОН) в единицу времени. Ограничение пропускной способности свойственно позиционным системам, в которых объект и опорная станция соединены двусторонней линией радиосвязи.

Быстродействие РНС (РНУ) определяется временем, которое затрачивается на получение навигационной информации.

Надежность характеризует свойство РНУ и РНС сохранять тактические параметры (в первую очередь точность) в заданных пределах при определенных условиях эксплуатации. В качестве основных показателей надежности используют *вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднюю наработку до отказа*.

Надежность навигационных средств сверхзвукового самолета должна быть такой, чтобы вероятность отказа не превышала 10^{-4} за три часа (средняя наработка до отказа не менее $3 \cdot 10^4$ ч). При полетах над океаном надежность навигационного оборудования должна обеспечивать практически полную безаварийность (одно летное происшествие по вине навигационного оборудования на 10^7 – 10^8 летных часов). Посадочное оборудование должно обеспечивать автоматическую посадку при вероятности летного происшествия, не превышающей 10^{-7} .

Целостность – доля времени, в течение которого потребителям точно известно, что параметры навигационной системы не выходят за допустимые пределы. Определяется своевременным и достоверным предупреждением потребителя о невозможности использовать какие-либо компоненты системы по целевому назначению в полном объеме.

Помехоустойчивость РНУ характеризует возможность работы РНУ (РНС) в условиях радиопомех. Для количественной оценки помехоустойчивости используют отношение сигнал/помеха (обычно по напряжению), при котором погрешность определения W не превышает выбранного значения с заданной вероятностью.

Эксплуатационная эффективность характеризует средние затраты времени на настройку, регулировку и обслуживание устройств и систем. Чем больше затраты времени на профилактические и ремонтные работы, тем ниже эксплуатационная эффективность РНУ или РНС.

Технические параметры это – совокупность величин, характеризующих технические средства, необходимые для получения заданных тактических параметров. Важнейшие технические параметры: значение и стабильность несущей частоты; вид и параметры модуляции излучаемых сигналов (формат сигнала); диаграммы направленности антенн; мощность передатчика; чувствительность приемника, масса и объем бортовой аппаратуры.