

РАДИОСИСТЕМЫ ДАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Особенности радиосистем дальней навигации

Международные РСДН («Omega» и «Loran-C»), снятые с эксплуатации, и российские РСДН «Альфа» (РСДН-20, «Маршрут») и «Чайка» («Тропик-2», РСДН-3,4,5, мобильные РСДН-10, «Скорпион») относятся к классу фазовых дальномерных или разностно-дальномерных РНС, основу которых составляют фазовые радиодальмеры (РД).

РСДН «Альфа» состоит из четырёх передатчиков, которые расположены в районе Мурманска, Новосибирска, Краснодара, Комсомольска-на-Амуре. Эти передатчики излучают последовательности сигналов длительностью 3,6 с на частотах 11,905 кГц, 12,649 кГц и 14,881 кГц. Введена в эксплуатацию в 1972 году. Дальность действия — 10 тыс. км от ведущей станции Точности местоопределения на 70% поверхности Земли не хуже 1,2...1,5 км. В полярных областях – 7-10 км.

Принцип действия фазовых радиодальмеров.

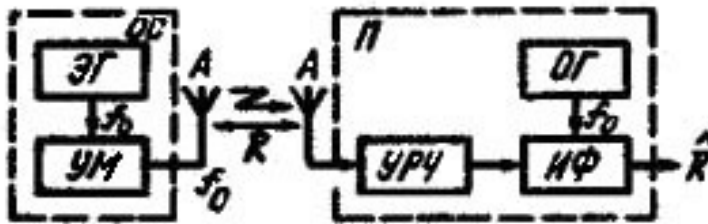


Рис.1. Основные элементы структурной схемы опорной станции и аппаратуры потребителя фазовой дальномерной РСДН

В момент t на измеритель фазы (ИФ) поступает сигнал опорной станции (ОС)

$$u_c = U_{mc} \sin \varphi_1 = U_{mc} \sin [\omega_0 (t - t_R) + \varphi_{01} + \varphi_{ап}],$$

где φ_{01} —начальная фаза; $\varphi_{ап}$ —сдвиг сигнала по фазе в цепях приемника, а $t_R=R/c$. Фаза φ_1 навигационного сигнала в ИФ сравнивается с фазой φ_0 опорного сигнала

$$u_o = U_{mo} \sin(\varphi_o) = U_{mo} \sin(\omega_0 t + \varphi_{02}).$$

Измеренная разность фаз

$$\varphi_{и} = \Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_1 = \omega_0 t_R - \varphi_{ап} + (\varphi_{02} - \varphi_{01}).$$

Информация о дальности R до ОС заключена в первой составляющей $\varphi_{и}$. Остальные составляющие должны быть известны и учтены при измерении. При выполнении этого требования $\varphi_{и}=\Delta\varphi=\omega_0 t_R$ и основное уравнение фазового дальмера принимает вид

$$R = (c/\omega_0) \Delta\varphi = M_\varphi \Delta\varphi, \tag{1}$$

где

$$M_\varphi = c/\omega_0 = \lambda/2\pi \tag{2}$$

– масштабный коэффициент. Частота ω_0 называется масштабной частотой.

Однозначность отсчета дальности. Одна из особенностей ФД – возможность многозначности, когда одному измеренному ИФ значению $\Delta\varphi$ соответствуют несколько значений R , отличающихся, как следует из (1), на $k\lambda_0$ где $k=1, 2, \dots$. Причина многозначности в цикличности фазы колебания, поэтому ИФ выдает один и тот же результат при $\Delta\varphi, \Delta\varphi+2\pi, \dots, \Delta\varphi+k2\pi$ (см. рис.2.). Для исключения этого явления необходимо выполнение условия однозначности отсчета:

$$\Delta\varphi = 2\pi R/\lambda_0 \leq 2\pi$$

Отсюда следует, что однозначно определяемая дальность

$$(R_{од})_{\max} \leq \lambda_0 \tag{3}$$

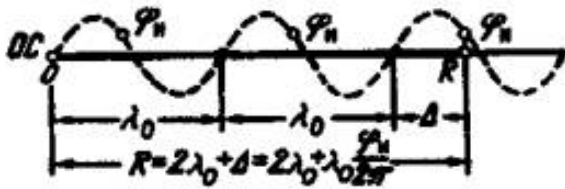


Рис.2. Связь дальности R и измеряемого фазового сдвига φ в фазовой дальномерной РСДН

имеет значения порядка единиц или десятков километров. В ситуации, когда измеряемая дальность $R > R_{\text{одн}}$ (рис.2), требуется найти целое число длин волн λ_0 или целое число циклов фазы, укладывающихся на измеряемой дистанции, т.е. найти число $n = \lfloor R/\lambda_0 \rfloor$ – ближайшее меньшее целое число ($\lfloor \dots \rfloor$ – знак округления), а затем измерить R фазовым РД.

Процедура нахождения n (*процедура разрешения многозначности*) выполняется путем грубого, но однозначного, измерения R с помощью, например, определения местоположения потребителя по системе счисления пути с последующим использованием фазового РД для уточнения результата определения дальности.

Точность измерения дальности. Из соотношений (1) и (2) следует, что при постоянном (на интервале измерения дальности) значении масштабного коэффициента M

$$\sigma_R = M_\varphi \sigma_\varphi = \lambda_0 \sigma_\varphi / 2\pi, \quad (4)$$

т.е. точность фазового РД будет тем выше, чем меньше длина волны λ_0 , однако при этом, как следует из (3), уменьшается $(R_{\text{одн}})_{\text{max}}$ и усложняется процедура разрешения многозначности.

Таким образом, в фазовых РД существуют противоречивые требования к значению масштабной частоты, так как увеличение ω_0 , способствуя повышению точности, ведет к сокращению зоны однозначного отсчета дальности. Обычно при выборе ω_0 отдают предпочтение точности, а возникающую многозначность отсчета разрешают с помощью многошкальных (многочастотных) измерителей.

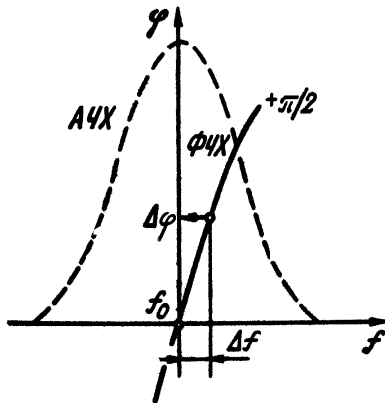


Рис.3 Дополнительный фазовый сдвиг сигнала при расстройке фильтра

измерителя фазы возникают трудности с предварительной узкополосной фильтрацией сигнала, особенно необходимой из-за малого значения q в РСДН. Использование в приемном тракте согласованного фильтра при малой ширине спектра сигналов РСДН, а следовательно, узкой полосе пропускания Δf_ϕ фильтра, выделяющего сигнал, нестабильности несущей частоты или частоты настройки фильтра f_0 (рис.3) вызывает из-за большой крутизны фазочастотной характеристики ФЧХ дополнительные фазовые сдвиги $\Delta\varphi$.

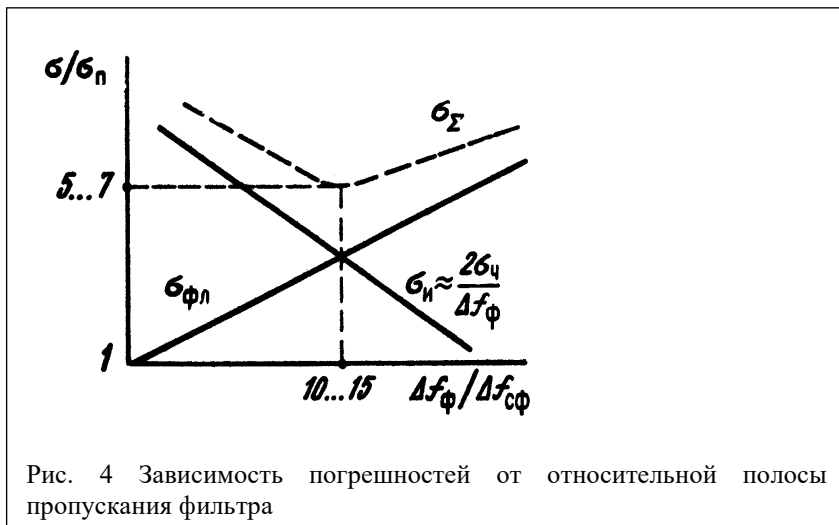
будет тем больше, чем длиннее волна λ_0 , на которой измеряется фаза $\Delta\varphi$, или чем меньше масштабная частота ω_0 . Однако значение λ_0 , соответствующее (3) при $(R_{\text{одн}})_{\text{max}} = R_{\text{max}}$, не может быть получено в РНУ систем дальней навигации с дальностью действия порядка нескольких тысяч километров. Дело в том, что максимальная длина волны в РСДН ограничена требуемой точностью (см. ниже) и возможными размерами передающих антенн ОС и

Что касается величины σ_φ , то ее предельное значение определяется потенциальной точностью измерения фазы (см. табл.2.2) и равно $(\sigma_\varphi)_\pi = q_{\text{max}}^{-1/2}$, где $q_{\text{max}} = E/N_0$ – максимальное отношение сигнала к шуму по мощности на входе измерителя фазы. Тогда потенциальная точность фазового РД будет характеризоваться погрешностью

$$(\sigma_R)_\pi = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{E/N_0}}.$$

На практике погрешность $\sigma_R > (\sigma_R)_\pi$, поскольку даже при реализации оптимального

Эти сдвиги приводят к погрешности $\sigma_n \approx 2\sigma_f / \Delta f_\phi$, где σ_f – среднее квадратическое значение нестабильности частоты. Полоса пропускания фильтра определяется из уравнения $\sigma_\Sigma = [\sigma_n^2 + \sigma_{\phi л}^2]^{1/2} = \min$, где $\sigma_{\phi л}$ – флуктуационная погрешность (рис. 4).



Поэтому полоса пропускания фильтра должна быть шире полосы согласованного фильтра, а результирующая погрешность выше $(\sigma_\phi)_л$. Рассмотренная особенность приводит к тому, что в аппаратуре потребителя согласованную фильтрацию сигнала выполняют обычно с помощью специальной программы при обработке дискретизированных сигналов ОС.

Рис. 4 Зависимость погрешностей от относительной полосы пропускания фильтра

Принцип действия цифрового фазового РД. Измерение дальности в рассматриваемом РД основано на преобразовании фазового сдвига $\Delta\phi$ во временной интервал Δt и заполнении этого интервала счетными импульсами. В простейшей схеме цифрового измерителя фазы $\Delta\phi$ (рис.5) опорный сигнал от генератора масштабной частоты (ГМЧ) и сигнал с выхода приемника (Прм) поступают на формирователи соответственно опорных ФОИ и сигнальных ФСИ импульсов. Опорный импульс (ОИ) открывает электронный ключ (ЭК) и разрешает поступление счетных импульсов с генератора ГСЧИ на счетчик (Сч). Сигнальный импульс (СИ) закрывает ЭК и прекращает подачу счетных импульсов на Сч.

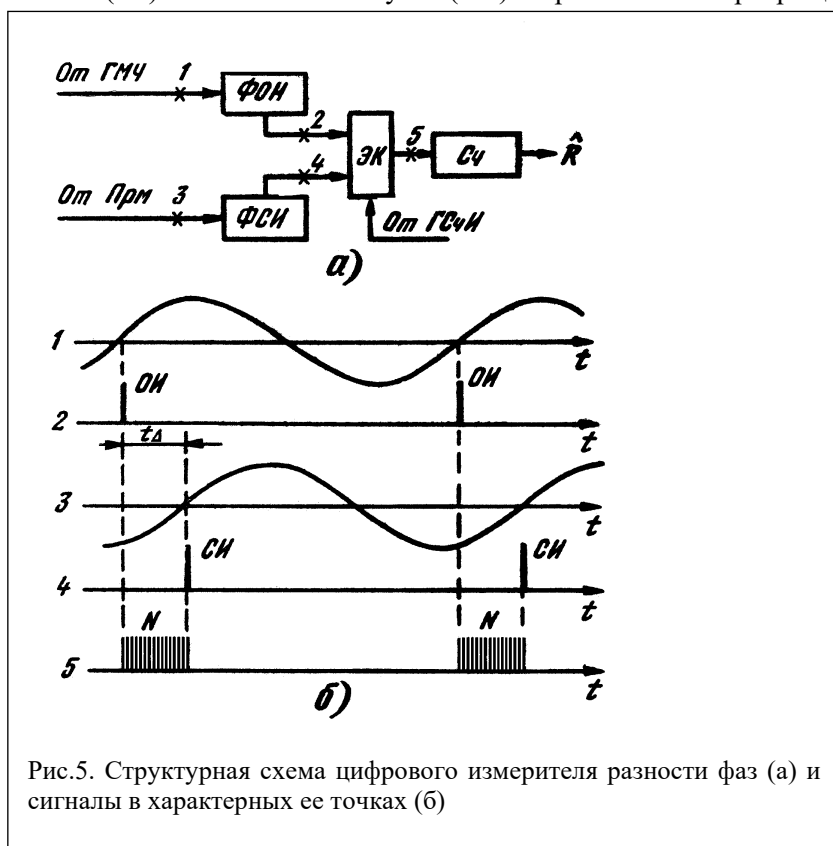


Рис.5. Структурная схема цифрового измерителя разности фаз (а) и сигналы в характерных ее точках (б)

Число подсчитанных импульсов $N = \Delta t / T_{сч}$, где $T_{сч}$ – период их следования. С выхода счетчика снимается код, содержащий оценку дальности R , получаемую в соответствии с выражением $R = c T_{сч} N$.

Цифровому методу измерения свойственна погрешность дискретизации $\Delta R_d = c T_{сч}$ которая тем меньше, чем выше частота следования счетных импульсов. Следует иметь в виду, что повышение точности при более высоких частотах следования импульсов требует увеличения быстродействия и емкости устройств счета.

2. Фазовая дальномерная РСДН

Рассмотрим принцип действия фазовой дальномерной РСДН на примере стандартной системы "Omega" (отечественная система имеет название «Маршрут» или «Альфа»), так как

региональные варианты систем этого типа отличаются главным образом числом и размещением опорных станций, а также меньшей дальностью действия. Система "Omega" разрабатывалась как разностно-дальномерная. Однако успехи в области создания высокостабильных бортовых эталонов частоты позволили реализовать в системе "Omega" дальномерный (квази-дальномерный) режим, обеспечивающий, как отмечалось выше, более высокую точность (меньший геометрический фактор).

При переходе в дальномерный режим не требуется замена опорных станций системы, необходима только модернизация АП и увеличение стабильности ее опорного генератора.

Рассматриваемая пассивная фазовая дальномерная РСДН (ФД РСДН) работала в диапазоне сверхдлинных волн ($f_0 \approx 10\text{кГц}$, $\lambda \approx 30\text{км}$) и позволяла получить практически глобальную зону действия, в пределах которой точность определения местоположения потребителя на поверхности Земли составляла несколько километров.

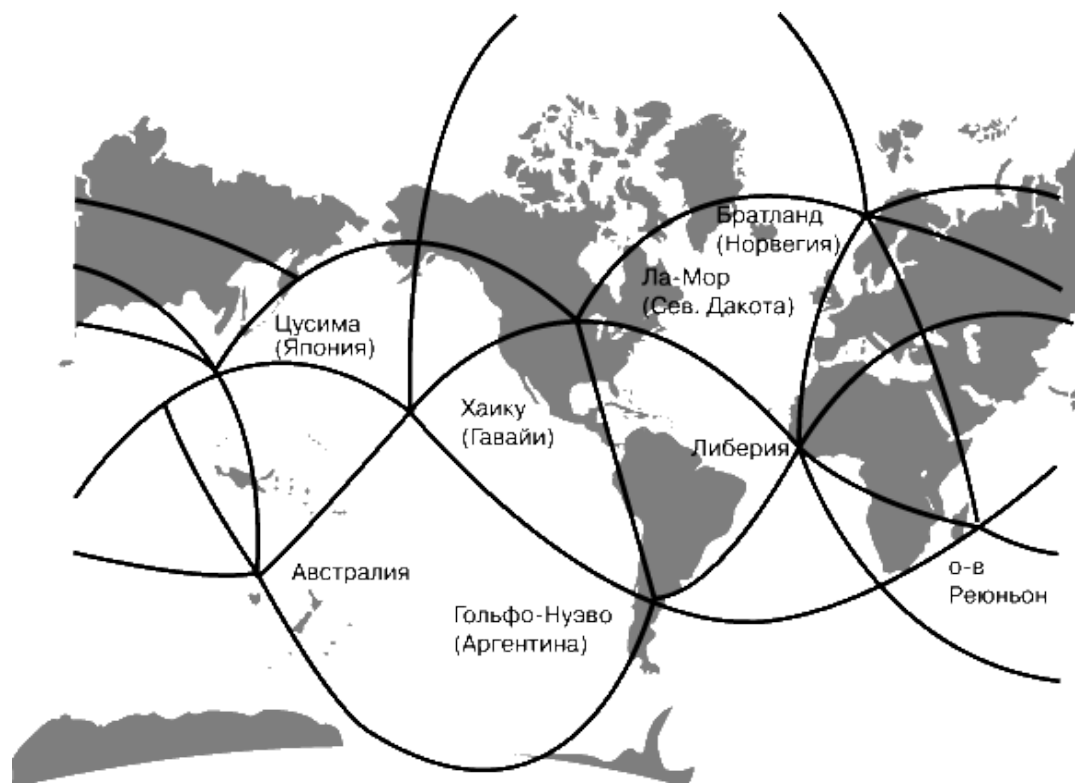


Рис.6. Расположение ОС радионавигационной системы «Omega»

Опорные станции ФД РСДН. Близкая к глобальной зона действия достигается применением восьми ОС, расположенных в разных районах земного шара на побережье и островах мирового океана, (рис. 6) что дало возможность потребителям получать навигационную информацию в тех областях, где отсутствовали другие средства навигации, а также способствовало увеличению дальности действия ОС. Отечественная РСДН «Маршрут» имеет в своем составе одну ведущую и три ведомых опорных станции на территории России. Опорные станции на рис.6 обозначены кружками. Все ОС работают на одинаковых несущих частотах. Синхронная работа ОС обеспечивается цезиевыми стандартами частоты ($\delta f = 10^{-12} \dots 10^{-13}$). Шкала времени системы периодически корректируется по шкале Всемирного координируемого времени (UTC).

Дальность действия ОС составляет 9...10тыс. км. Антенны наземных ОС достигают высоты более 400м и излучают мощность около 10кВт.

Навигационные сигналы системы «Omega». (рис.7) излучаются ОС в строго определенной последовательности и содержат по восемь импульсных посылок со средней длительностью $\tau_{ср}=1\text{с}$. Сигналы одной и той же частоты излучаются ОС поочередно. Защитные интервалы (0,2с) введены для предотвращения интерференции сигналов в точке приёма и для защиты от воздействия переходных процессов при переключении ОС на излучение сигнала другой частоты и снижения требований к точности коммутации сигналов ОС в аппаратуре потребителя до 0,1с. Цикл передачи сигналов $T_{ц}=10\text{с}$.

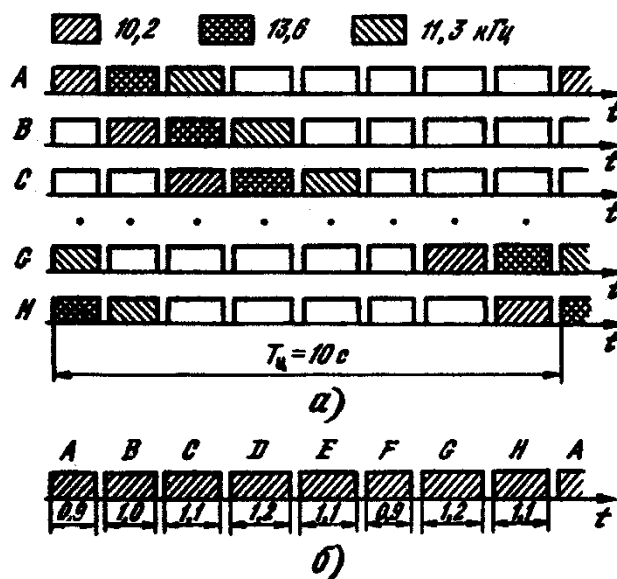


Рис.7. Частотно-временная диаграмма сигналов (а), излучаемых опорными станциями А,В,С,Д,Е,Ф,Г,Н, стандартной системы “Омега”, и временная диаграмма сигналов (б), излучаемых опорными станциями на частоте $f_{01}=10,2$ кГц

Начало цикла привязано к шкале Всемирного координированного времени. Оpoznание ОС производится по порядку чередования частот заполнения импульсных посылок и по специальным частотам, выделенным для данной ОС (11,8 – 13кГц) и заполняющим «пустые» интервалы на рис.6. Каждая из ОС в известный момент времени начинает передачу сигналов на частотах 10,2; 11,3; и 13,6кГц. Частота $f_{01}=10,2$ кГц служит для точного определения местоположения ($\lambda_0 \approx 29,5$ км). На разностных частотах $\Delta F_1=13,6 - 10,2=3,4$ кГц; $\Delta F_2=11,3-10,2=1,1$ кГц, $\Delta F_3=13,6-11,3=2,1$ кГц можно устранить многозначность отсчета ($\Delta\lambda_1 \approx 88$ км, $\Delta\lambda_2 \approx 273$ км, $\Delta\lambda_3=143$ км). Для этого обычно используют сигналы на частотах ΔF_1 и ΔF_2 .

Разрешение многозначности. Измерение дальности на основной частоте f_{01} , как правило, сопровождается неоднозначностью отсчета, когда показания измерителя фазы φ_n и реальная разность фаз $\Delta\varphi$ связаны соотношением

$$\Delta\varphi = 2\pi n + \varphi_{n1}. \quad (5)$$

Определение числа n в ФД РСДН основано на многошкальном методе, при котором формируется грубая шкала на разностной частоте и используется однозначная, но не очень точная, информация о местоположении от системы счисления координат потребителя.

Система счисления находит положение точки П на рис.8,а с СКП σ_c . Положение точки П в зоне неопределенности системы счисления, равной $\pm\sigma_c$, уточняется по результатам измерений фазы на разностной частоте $\Delta F_{21}=f_2-f_1$, где f_1 и f_2 – близкие друг другу частоты опорных станций. Если измерить фазы навигационных сигналов с частотами f_{01} и f_{02} и образовать разность $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$, то $\Delta\varphi_{21}=\Delta\varphi_2-\Delta\varphi_1=2\pi(f_{02}-f_{01})R/c=(2\pi\Delta F_{21}/c)R=(2\pi/\lambda_{21})R$

Формирование $\Delta\varphi_{21}$ равносильно измерению фазы на низкой частоте ΔF_{21} , на которой интервал однозначного измерения фазы $R_{од21}=\lambda_{21}=c\Delta F_{21}^{-1}$, а СКП измерения $\sigma_{R21} \ll \sigma_c$. Входящее в (5) неизвестное число n определяется как $n=\lfloor R_c\lambda_{21}^{-1} \rfloor$, где R_c —дальность, найденная по системе счисления пути. Для сопряжения шкалы, формируемой системой счисления с более точной шкалой (рис.8 б), организованной на частоте ΔF_{21} , т. е. для предотвращения потери информации о дальности R (о числе λ_{21}) при переходе на более точную (но неоднозначную) шкалу, необходимо выполнить очевидное условие:

$$k_3\sigma_c \leq \lambda_{21} = c/\Delta F_{21}, \quad (6)$$

где k_3 – коэффициент запаса.

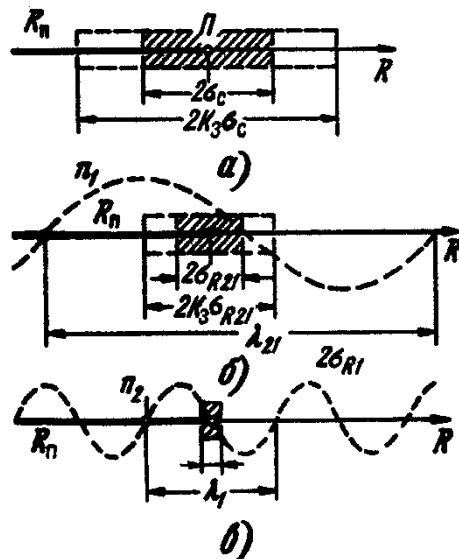


Рис.8. Диаграммы измерения дальности потребителя на грубой (а), средней (б) и точной (в) шкалах

Для расчета k_3 нужно задать допустимую вероятность ошибочного считывания дальности (сбоя) $P_{сб}$, равную

$P_{сб}=1-P_{п.о.}$, где $P_{п.о.}$ – вероятность правильного отсчета R при смене шкал. При гауссовском распределении погрешностей

$$P_{сб} = 1 - \Phi(k_3), \quad (7)$$

где $\Phi(x)$ —интеграл вероятности.

Расчет по формуле (7) показывает, что для обеспечения $P_{сб}=10^{-5}-10^{-7}$ коэффициент запаса должен лежать в пределах 4,4–5,3. По найденному коэффициенту k_3 можно, используя (6), найти значение разностной частоты ΔF_{21} .

Затем дальность уточняют по точной шкале (рис.7,в) формируемой на несущей частоте. При этом, условие сопряжения шкал (6) принимает вид: $k_3\sigma_{\phi 21} \leq \lambda_1 = c/f_1$, где $\lambda_1 = R_{од1}$ – интервал однозначного измерения дальности на частоте f_1 . Если это условие не выполняется, то используется промежуточная шкала на разностной частоте $\Delta F_{31} = f_3 - f_1$ где f_3 – дополнительная несущая частота ОС ($f_1 < f_3 < f_2$).

Структурная схема аппаратуры потребителя ФД РСДН. В аппаратуре потребителя (рис.9) поочередно принимаемые навигационные сигналы ОС поступают с антенно-фидерного устройства (АФУ) на три идентичных, но настроенных на разные частоты канала К1 – К3 (на схеме раскрыт только канал К1).

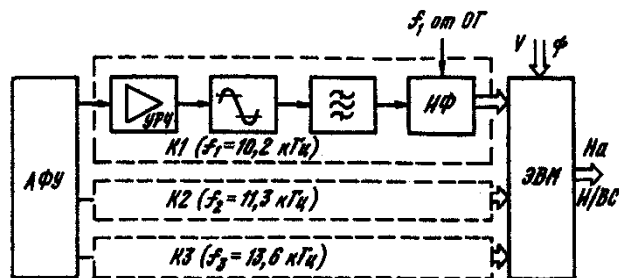


Рис.9. Структурная схема аппаратуры потребителя системы "Omega".

После усиления в УРЧ, амплитудного ограничения и узкополосной фильтрации навигационный сигнал подается на измеритель фаз (ИФ), где его фаза сравнивается с фазой опорного сигнала, вырабатываемого генератором ОГ. Генератор ОГ служит для получения всех частот и синхросигналов, необходимых для работы аппаратуры потребителя, и строится на основе рубидиевого стандарта частоты

(в квази-дальномерной аппаратуре может использоваться генератор с кварцевой стабилизацией). Результаты измерения разности фаз сигналов всех ОС относительно опорного сигнала поступают в ЭВМ (специализированный процессор), которая выдает на индикатор (И) и внешние системы (ВС) результат расчета местоположения потребителя. В ЭВМ производится также счисление пути по информации о скорости V и курсе ψ потребителя, а полученные данные используются вместе с вычисленными разностями фаз $\Delta\varphi_{21}$ и $\Delta\varphi_{31}$ для разрешения многозначности. В ЭВМ могут включаться и отдельные элементы ИФ. В блоке памяти ЭВМ хранятся данные о координатах всех ОС и поправки на непостоянство фазовой скорости распространения радиоволн.

Измеритель фаз (рис. 10,а) реализует алгоритм оптимальной оценки фазы сигнала u_c , поступающего с узкополосного фильтра приемного тракта, и построен по квадратурной схеме.

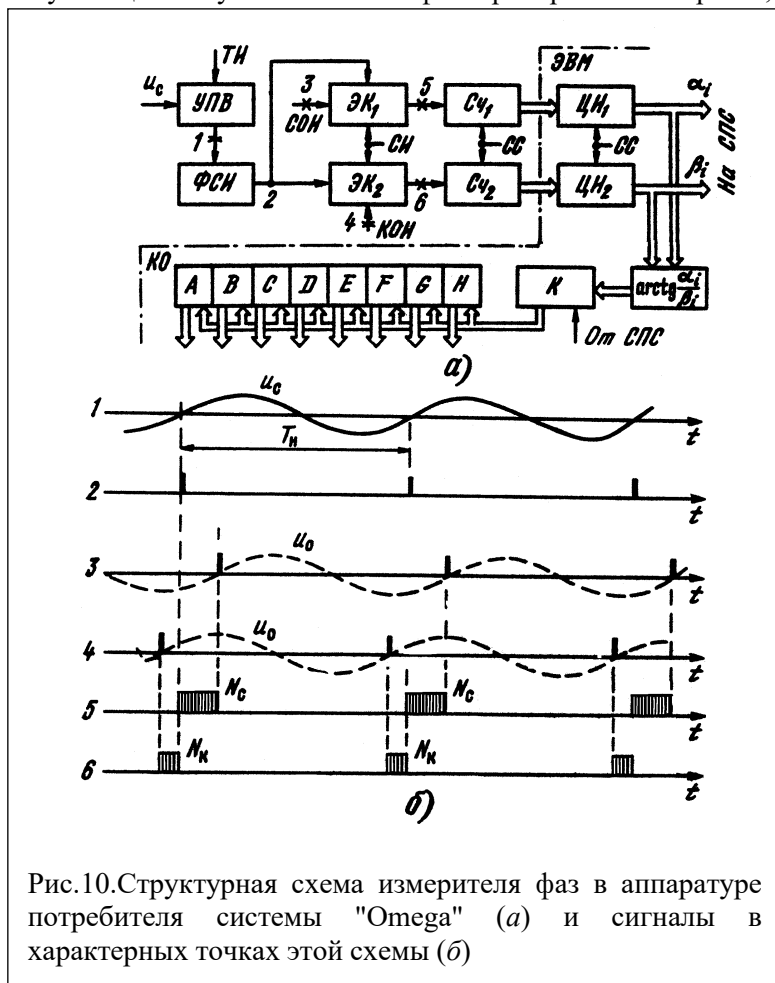


Рис.10. Структурная схема измерителя фаз в аппаратуре потребителя системы "Omega" (а) и сигналы в характерных точках этой схемы (б)

где φ_{ki} — измеряемый на k -м периоде несущей частоты сдвиг фазы принятого сигнала в i -й выборке. Цифровые значения $\sin(\varphi_{ki})$ и $\cos(\varphi_{ki})$ накапливаются в цифровых интеграторах (ЦИ), сигналы которых пропорциональны

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^m \sin \varphi_{ki} \text{ и } \beta_i = \sum_{k=1}^m \cos \varphi_{ki} \text{ , } \quad (8)$$

где m — число измерений фазы за каждую выборку.

Оценки фазы $\varphi_i = \text{arctg}(\alpha_i/\beta_i)$ с помощью коммутатора K распределяются по ячейкам памяти A, B, C, \dots, H канала

обработки (КО). Комбинируя эти оценки, можно определить дальность до ОС или разность дальностей. устранить многозначность и выполнить другие необходимые вычисления.

Поиск сигнала. Чтобы коммутатор K подключал ту ячейку памяти, которая соответствует излучающей в данный момент ОС, он должен работать синхронно с ОС (см. рис.7,а). Такую синхронизацию выполняет схема поиска сигналов (СПС). В режиме поиска функционирует только тот канал приемника, который настроен на частоту f_{01} . Если в точке приема присутствуют сигналы всех ОС, то огибающая принимаемого при этом сигнала имеет вид, показанный на рис.7.б (задержкой сигналов при распространении от ОС можно пренебречь, поскольку она гораздо меньше $\tau_{cp} \approx 1c$). Задача поиска

устройстве получения выборок УПВ цикл $T_{ц}$ навигационного сигнала с помощью тактовых импульсов (ТИ), вырабатываемых опорным генератором (ОГ), разбивается на N (например, 100) элементов (выборок) длительностью Δ_b ($N=T_{ц}/\Delta_b$). При этом сигнал каждой ОС с $\tau_{cp} \approx 1c$ (см. рис.7,б) представлен $n=1/\Delta_b$ выборками.

Формирователь сигнальных импульсов ФСИ вырабатывает импульсы при переходе u_c через нулевое значение (рис 10,б).

С опорного генератора (ОГ) на ИФ поступают синусные (СОИ) и косинусные (КОИ) опорные импульсы, формируемые в тот момент, когда опорное напряжение u_0 с начальной фазой, равной соответственно 0 или 90° , проходит через нулевое значение. Кроме того, с ОГ подаются счетные импульсы (СИ) и синхросигналы (СС). Сигнальные и опорные импульсы управляют электронными ключами (ЭК), число счетных импульсов на выходе которых (N_c или N_k) преобразуются счетчиками Сч в $\sin(\varphi_{ki})$ или $\cos(\varphi_{ki})$,

заключается в совмещении формируемого в аппаратуре потребителя опорного кода (ОК) (рис.11,*а*) и принимаемого сигнала (рис.11,*б*) на основе корреляционного метода. Максимум корреляционной функции (КФ) соответствует совпадению совмещаемых сигналов с точностью до Δ_b (рис.11,*в*).

В реальных условиях из-за слабой интенсивности сигналов отдельных ОС и влияния помех характер временной диаграммы может отличаться от показанного на рис.7,*б*. Однако при достаточно большом времени накопления информации максимум получаемой КФ с большой вероятностью соответствует совпадению сравниваемых сигналов и определяет начало цикла принимаемого и опорного сигналов.

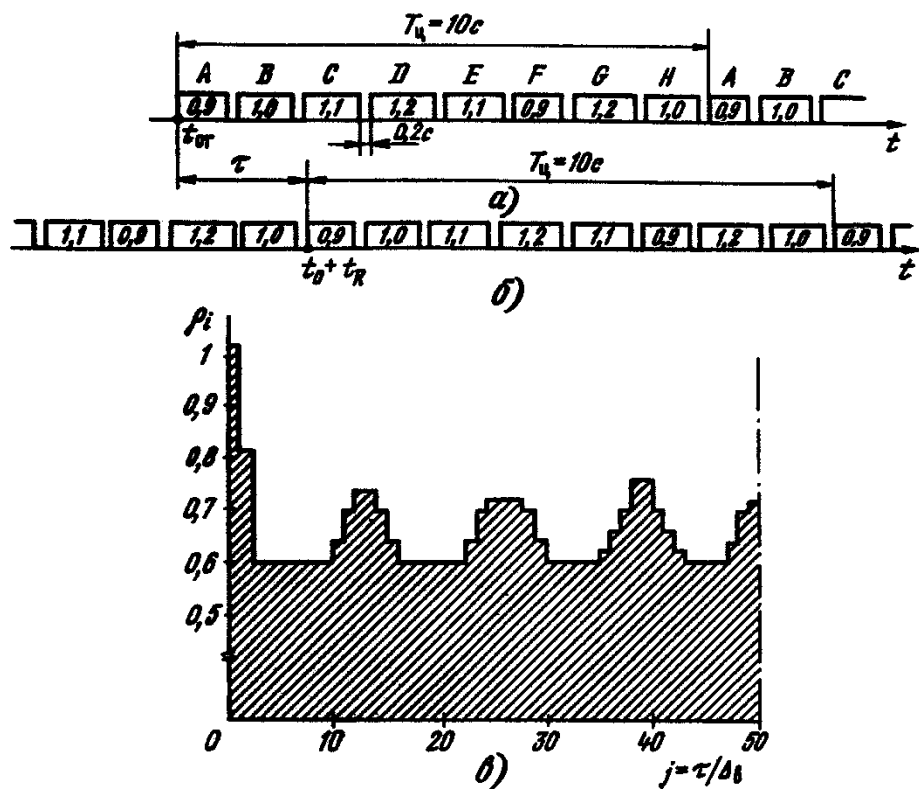


Рис.11. Временная диаграмма опорного кода (*а*), принимаемого сигнала (*б*) и нормированная корреляционная функция этих сигналов (*в*)

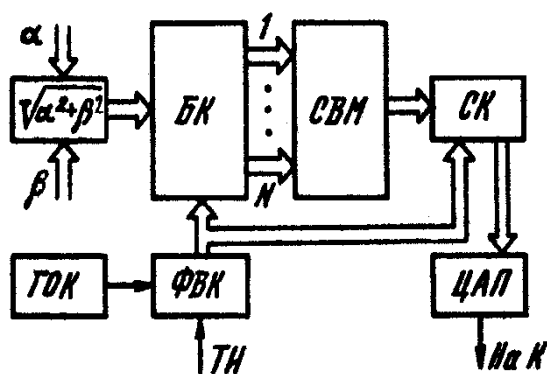


Рис.12. Структурная схема устройства поиска сигнала в аппаратуре потребителя системы "Omega".

Схема поиска сигналов (рис.12) построена по принципу обнаружителя радиосигнала с неизвестной начальной фазой и реализует параллельный поиск, при котором время вхождения в синхронизацию минимально. Сформированные в измерителе фаз значения α_i и β_i (8) поступают на блок формирования

величины $z_i = [\alpha_i^2 + \beta_i^2]^{1/2}$, пропорциональной амплитуде i -й выборки сигнала. Блок корреляторов (БК) содержит N каналов, каждый из которых вычисляет

$$\Psi_i = \sum_{j=1}^N z_j K_{i-j},$$

где K_{i-j} — последовательность, соответствующая ОК и сдвинутая относительно первого канала на j шагов.

Опорный код (ОК) от генератора (ГОК) поступает на формирователь выборок кода (ФВК), который управляет тактовыми импульсами (ТИ) и вырабатывает N цифровых эквивалентов ОК, сдвинутых друг относительно друга на Δ_v . Схема выбора максимума (СВМ) определяет номер канала БК, в котором наблюдается максимальный сигнал, а следовательно, находит то значение j , которое соответствует наибольшему совпадению ОК с огибающей принятого сигнала. Код с такой задержкой выделяется селектором СК, подвергается (при необходимости) цифро-аналоговому преобразованию в ЦАП и используется для управления коммутатором K (см. рис.10,а), а также другими схемами, требующими синхронизации с циклом работы ОС.

Отметим, что время поиска сигнала $q=2$ не превышает 20с. При $q < 0,2$ интервал измерения координат составляет примерно 5мин.

при отношении мощностей сигнала и шума времени до получения результата первого

3. Фазовая разностно-дальномерная РСДН

Типичным примером фазовой разностно-дальномерной РСДН является стандартная система «Loran-C» (Long range), региональные варианты которой до сих пор используются в некоторых областях земного шара для вождения морских и воздушных судов. Аналогичные отечественные системы имеют наименования «Тропик» и «Чайка».

Рассматриваемая пассивная фазовая разностно-дальномерная РСДН (ФРД РСДН) «Loran-C» работает на несущей частоте 100кГц ($\lambda = 3\text{км}$) и обеспечивает навигационное обслуживание примерно 3/4 северного полушария Земли с точностью на порядок более высокой чем у ФД РСДН (СКП около 0,1-1,0 км).

В системе используется импульсный сигнал, на частоте заполнения, которого (на несущей частоте) измеряется разность фаз, соответствующая разности дальностей до двух опорных станций. Поэтому ФРД РСДН называют также *импульсно-фазовыми*.

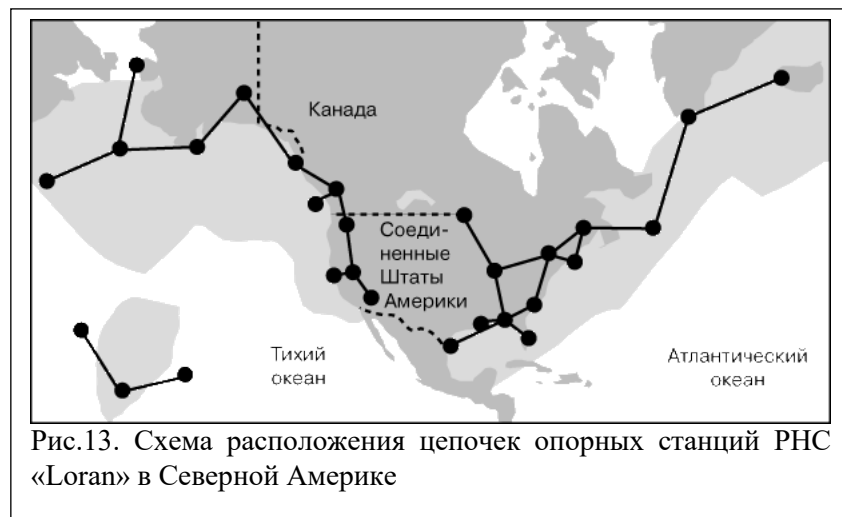


Рис.13. Схема расположения цепочек опорных станций РНС «Loran» в Северной Америке

Опорные станции ФРД РСДН. ФРД РСДН включает так называемые *цепочки* береговых ОС (рис. 13), содержащие 3–5 ОС. Одна из этих ОС является *ведущей* и обозначается буквой М, а другие (X , Y , Z , W) – *ведомыми*. Размеры баз цепочки ОС около 1000 км. К настоящему времени созданы и эксплуатируются более 25 цепочек опорных станций «Loran-C» и «Чайка», перекрывающих своими рабочими зонами поверхность более 90000км². В России работают три цепочки по 5 опорных станций

«Чайка»: Европейская Восточная и Северная, а также Российско-Американская цепочка из 3 станций. Синхронизация работы ОС обеспечивается цезиевыми стандартами частоты ($\delta f = 5 \cdot 10^{-13}$). Шкала времени системы периодически (примерно 6 раз в сутки) приводится в соответствие со шкалой Всемирного координированного времени. Ответственной за синхронизацию и когерентность сигналов опорных станций данной цепочки является ведущая ОС.

Дальность действия каждой ОС примерно 2000км. На ОС используются антенны высотой около 200м, излучающие мощность (импульсную) от 165 до 1800кВт (в зависимости от ОС). Передатчик содержит 64 индивидуальных генераторных блока. Эти блоки служат для формирования переднего фронта излучаемых импульсов и вырабатывают каждый по половине периода несущей частоты с определенной амплитудой. На рис 14 показан общий вид передающей ОС «Чайка».

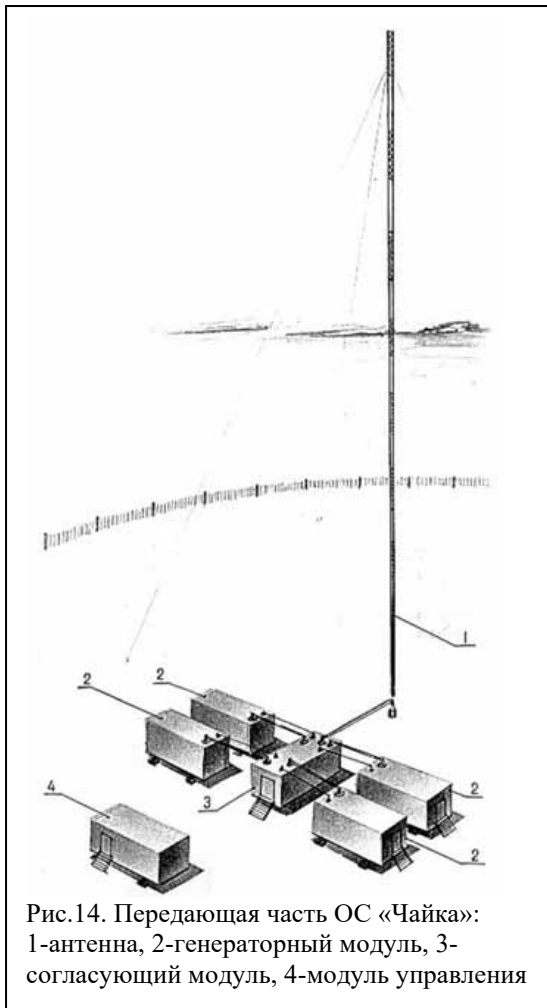


Рис.14. Передающая часть ОС «Чайка»: 1-антенна, 2-генераторный модуль, 3-согласующий модуль, 4-модуль управления

Навигационные сигналы системы «Logan-C»

(рис. 15) состоят из пачек импульсов, содержащих девять (ведущая ОС) или восемь (ведомые ОС) импульсов с когерентным заполнением. Импульсы (кроме девятого) кодируются по фазе (0, π) специальными кодами (коды Голея). Коды разные для сигналов ведущей (M) и ведомых (X, Y, Z, W) станций, а также для сигналов, излучаемых в чётные и нечётные групповые периоды повторения $T_{гр}$ (периоды повторения пачек), значения которых составляют 0,04–0,1с.

Излучаемые ОС импульсы имеют близкую к колоколообразной форму и специально сформированный в передатчике передний фронт. Период повторения импульсов в каждой пачке $T_{п.и}$ выбирается так, чтобы в пределах рабочей зоны каждой цепочки отсутствовали бы области одновременного приема следующих друг за другом импульсов данной пачки.

Групповой период повторения $T_{п.г}$ и задержки моментов излучения сигналов ведомыми опорными станциями t_{zi} , где $i=X, Y, Z, W$ индивидуальны для каждой цепочки ОС, что служит для опознавания этих цепочек. Ведомые ОС излучают сигналы в строгой последовательности, определяемой значениями t_{zi} . Поэтому после приема сигнала ведущей станции всегда следует прием сигнала ведомой ОСX, затем – ОСY и т.д. Такой режим работы цепочек ОС облегчает последовательный поиск сигналов этих ОС.

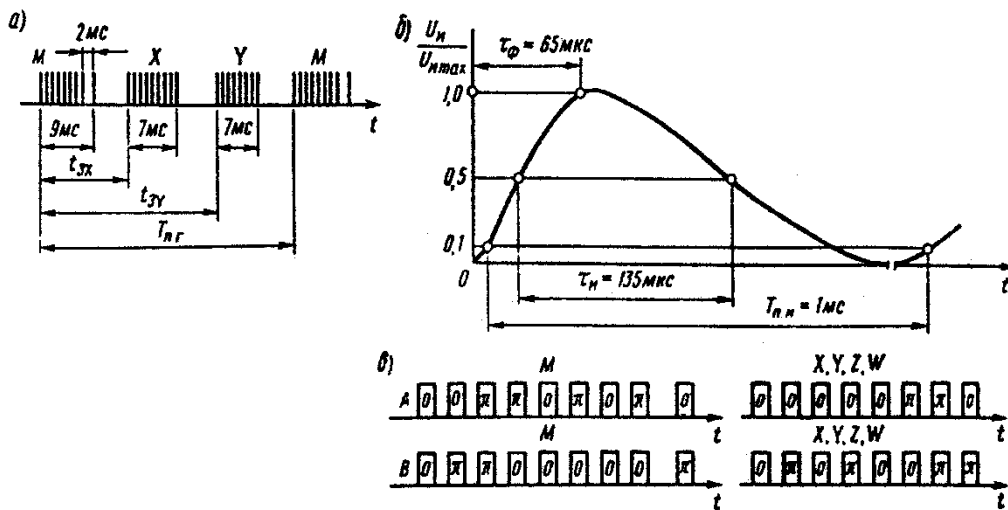


Рис.15. Навигационный сигнал системы " Logan - C":

a - пачки импульсов ведущей (M) и ведомых (X, Y) станций; *б* - форма огибающей импульсов; *в* - закон фазового кодирования импульсов в четных (A) и нечетных (B) периодах

Характерная точка огибающей (ХТО) находится на уровне половинной амплитуды принимаемого импульса, соответствует максимальной крутизне фронта и используется для выделения того периода несущих колебаний, по которому измеряется НЭ. Такой приём способствует защите от сигнала пространственной волны, но приводит к энергетическим потерям в 6дБ в сравнении с измерением в максимуме импульса.

Передача дополнительной информации осуществляется путём низкочастотной модуляции навигационных сигналов. При неисправности ОС-цепочки излучения девятого импульса ведущей ОС периодически прерываются, а соответствующая ведомая ОС каждые 4с прекращает излучение первых двух импульсов пачки на 0,25с. Для межстанционной телетайпной связи используется времяимпульсная модуляция (сдвиг на ±1мкс) двух последних импульсов пачки.

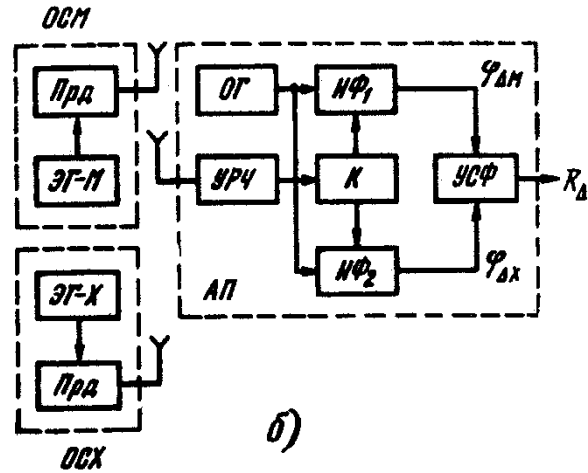


Рис. 16. Основные элементы структурных схем опорных станций и аппаратуры потребителя ФРД РСДН

Принцип действия ФРД РСДН. Основные элементы ФРД РСДН показаны на рис.16. Предполагается, что поиск нужной цепочки уже окончен и опорные станции ОСМ и ОСХ поочередно излучают когерентные колебания частоты ω_0 , формируемые эталонными генераторами (ЭГ) и передатчиками (Прд). В аппаратуре потребителя (АП) принятые навигационные сигналы после УРЧ подаются на коммутатор (К), работающий синхронно с переключениями ОС.

При этом сигнал ОС-М направляется в измеритель фаз (ИФ₁), а сигнал ОС-У – в (ИФ₂). Каждый из ИФ определяет фазовый сдвиг соответствующего сигнала относительно сигнала опорного генератора (ОГ). Полученные значения $\Delta\varphi_M$ и $\Delta\varphi_X$ запоминаются, а затем сравниваются в устройстве сравнения фаз (УСФ). Сигнал на выходе УСФ пропорционален искомой разности дальностей ΔR от потребителя до ОС-М и ОС-Х.

Допустим, что ОС-Х излучает сигнал с известной задержкой t_{3X} относительно сигнала ОС-М, скорость распространения радиоволн постоянна и доплеровский сдвиг частоты отсутствует. Тогда принимаемые потребителем сигналы можно записать в виде:

$$u_M(t) = U_{mM}(t - t_{RM}) \cos[\omega_0(t - t_{ап} - t_{RM})] = U_{mM}(t - t_{RM}) \cos \varphi_M;$$

$$u_X(t) = U_{mX}(t - t_{RX}) \cos[\omega_0(t - t_{3X} - t_{ап} - t_{RX})] = U_{mX}(t - t_{RX}) \cos \varphi_X,$$

где $t_{ап}$ – задержка сигнала в аппаратуре потребителя, а t_{RM} и t_{RX} – время прохождения сигналом расстояний R_M и R_X до соответствующих ОС.

Опорный сигнал имеет ту же частоту, но отличается по фазе от принятых сигналов:

$$U_0 = U_{m0}(t) \cos(\omega_0 t - \varphi_{ог}) = U_{m0} \cos \varphi_0$$

где $\varphi_{ог}$ – неизвестная начальная фаза ОГ.

Измеренные ИФ₁ и ИФ₂ фазы сигналов ОС:

$$\Delta\varphi_M = \varphi_0 - \varphi_M = \omega_0 t_{RM} + \omega_0 t_{ап} - \varphi_{ог};$$

$$\Delta\varphi_X = \varphi_0 - \varphi_X = \omega_0 t_{RX} + \omega_0 t_{ап} + \omega_0 t_{3X} - \varphi_{ог},$$

а сигнал с УСФ пропорционален

$$\Delta\varphi_{MX} = \Delta\varphi_M - \Delta\varphi_X = \omega_0(t_{RM} - t_{RX} - t_{3X}) = (\omega_0/c)(R_M - R_X) - \omega_0 t_{3X} = (2\pi/\lambda_0)\Delta R - \omega_0 t_{3X}$$

и не содержит неизвестных фазовых сдвигов $\omega_0 t_{ап}$ и $\varphi_{ог}$. Независимость от $\varphi_{ог}$ достигается при такой стабильности ОГ, при которой значение $\varphi_{ог}$ не изменяется за время формирования $\Delta\varphi_{MX}$.

С учетом известной задержки t_{3X} основное уравнение фазового разностно-дальномерного устройства

$$\Delta R = (\lambda_0/2\pi)\Delta\varphi_{MX} = M\Delta\varphi_{MX}$$

аналогично основному уравнению (1) фазового дальномера.

Основной особенностью, влияющей на точность рассматриваемой РСДН и построение аппаратуры потребителя, является возможность интерференции поверхностной $E_{пов}$ (полезной) и пространственной $E_{пр}$ (мешающей) волн в точке приема (рис.17)– соответствует равенству фаз сигналов $E_{пов}$ и $E_{пр}$).



Рис. 17 Результаты интерференции поверхностной $E_{пов}$ и пространственной $E_{пр}$ волны

Пространственный сигнал, образуемый при отражении от ионосферы, всегда запаздывает на время $t_3 \geq 40$ мкс относительно поверхностного сигнала. Поэтому у результирующего сигнала E (рис.17) передний фронт остается неискаженным только первые 30 мкс (или первые три периода несущей частоты). Этот участок и используются для точного измерения фазы. Для выделения требуемого периода несущей частоты используется *характерная точка*

огibaющей ХТО, в которой крутизна фронта максимальна (эта точка специально формируется в аппаратуре ОС).

Аппаратура потребителей ФРД РСДН. Обобщенная структурная АП показана на рис.18

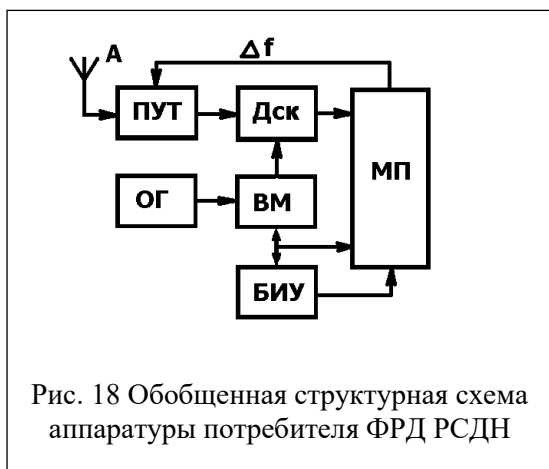


Рис. 18 Обобщенная структурная схема аппаратуры потребителя ФРД РСДН

Принятый от ОС сигнал проходит предварительное усиление и фильтрацию в приемно-усилительном тракте (ПУТ) с переключаемой полосой пропускания Δf и поступает на дискриминатор (Дск), который вместе с временным модулятором (ВМ) является элементом системы слежения за сигналом. Обратная связь этой системы замыкается через микропроцессор (МП).

Работа АП начинается с выбора нужной цепочки ОС оператором через блок индикации и управления (БИУ). При этом с помощью опорного генератора (ОГ) и ВМ устанавливается шкала времени АП, соответствующая групповому периоду повторения $T_{гр}$ выбранной цепочки ОС. Дальнейшие операции в АП выполняются с использованием этой шкалы, начало которой $(T_{гр})_0$ не связано с циклами работы ОС. Первая и важная из

этих операций – поиск сигналов преследует цель не только обнаружить сигнал, но и определить грубо разность дальностей до ОС и тем самым исключить возможность появления многозначности при фазовых измерениях. По окончании поиска АП переходит к измерению фаз принятых сигналов и уточнению полученной во время поиска грубой оценки НЭ.

Поиск сигналов производится по огibaющей принимаемых от ОС пачек импульсов и выполняется в три этапа: грубый поиск, точный поиск и точная синхронизация. Возможная структурная схема АП при работе в режиме поиска показана на рис.19.

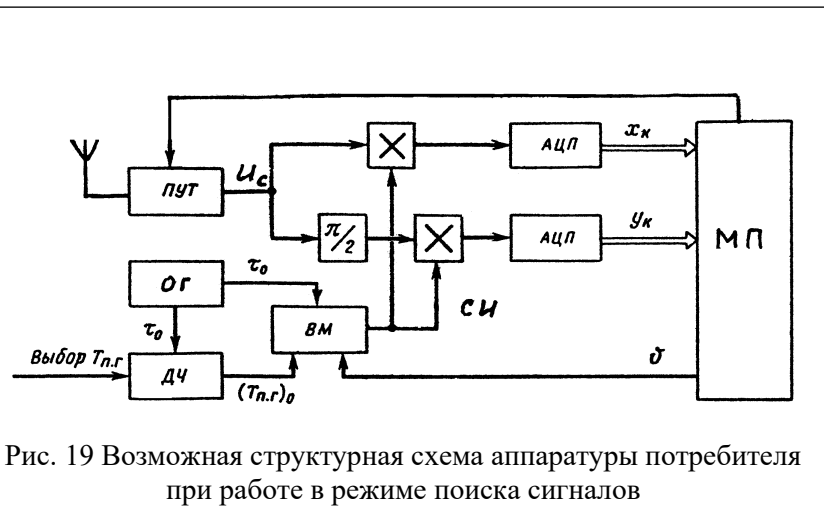


Рис. 19 Возможная структурная схема аппаратуры потребителя при работе в режиме поиска сигналов

Устройство поиска представляет собой вариант квадратурного цифрового обнаружителя. Опорный генератор (ОГ) вырабатывает тактовые импульсы с периодом повторения τ_0 , составляющим десятые доли микросекунды. Эти импульсы используются во временном модуляторе (ВМ) при точном

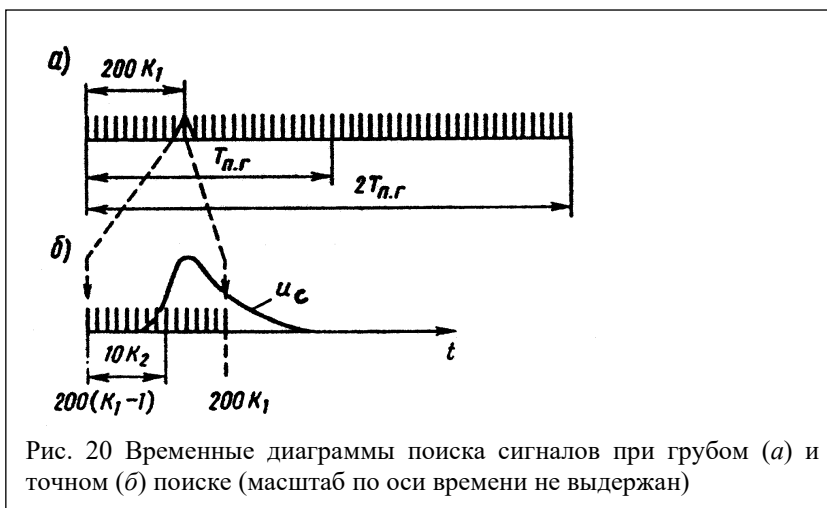


Рис. 20 Временные диаграммы поиска сигналов при грубом (а) и точном (б) поиске (масштаб по оси времени не выдержан)

импульсов ОСМ различны в соседних $T_{п.г}$.

Цель режима грубого поиска заключается в обнаружении сигнала ведущей станции (ОСМ). При грубом поиске временной модулятор (ВМ), включаемый импульсом с делителя частоты (ДЧ), подсчитывает тактовые импульсы опорного генератора (ОГ) и формирует стробирующие импульсы СИ₁ для квадратурного дискриминатора, которые следуют с периодом 200мкс, равным длительности импульса u_c на выходе согласованного фильтра (рис.20).

В перемножителях квадратурных каналов формируются синусные и косинусные выборки приходящего сигнала, которые преобразуются в АЦП в дискретные сигналы x_k и y_k , поступающие в k -й канал ОЗУ микропроцессора. Каждому из стробирующих импульсов соответствуют 4 ячейки памяти ОЗУ (два квадратурных сигнала x_{1k} и y_{1k} в первом $T_{п.г}$ и x_{2k} и y_{2k} во втором), число каналов поиска $N=2T_{п.г}/200$.

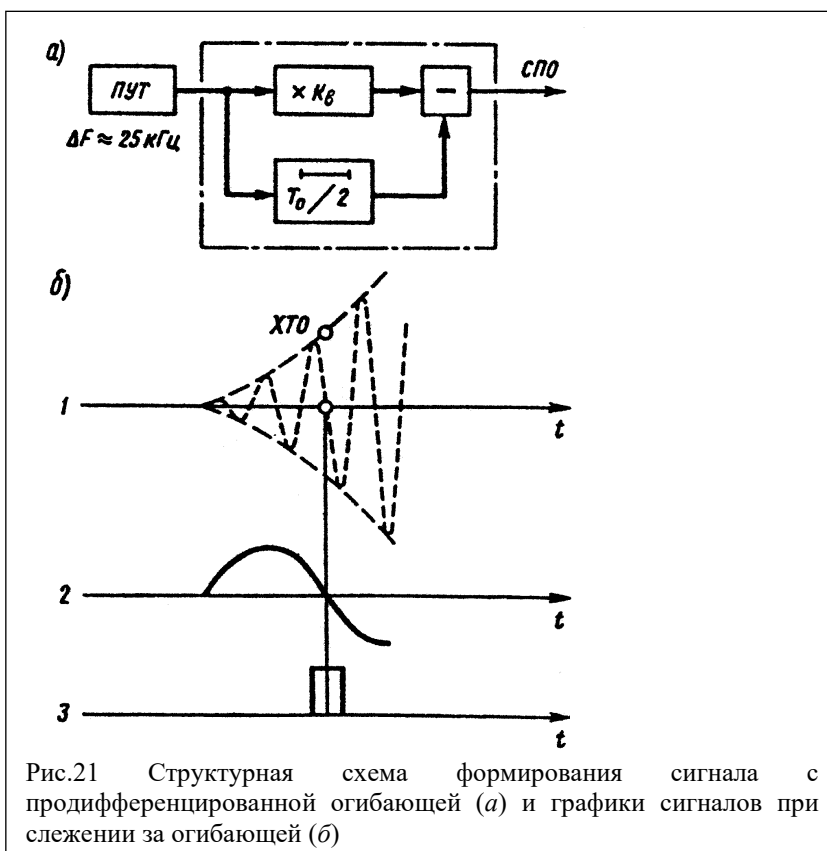


Рис.21 Структурная схема формирования сигнала с проинтегрированной огибающей (а) и графики сигналов при слежении за огибающей (б)

(по максимальному числу ОС в цепочке). Каждый из каналов содержит свой дискриминатор (Дск), на который с общего временного модулятора подаются стробирующие импульсы (СИ₂) с периодом следования, например 10мкс, и повторяется тот же процесс, что и при грубом поиске, только теперь

определении задержки и для получения сигналов $T_{п.г}$, определяющих значение группового периода повторения данной цепочки ОС и момент $(T_{п.г})_0$ запуска ВМ. В режиме грубого поиска полоса пропускания ПУТ сужается до 5кГц, что соответствует полосе согласованного с импульсом фильтра и приводит к увеличению отношения мощностей сигнала и шума, расширению импульса до 200мкс на выходе ПУТ. Интервал поиска составляет $2T_{п.г}$, так как законы фазового кодирования

Сигналы x_k и y_k накапливаются на m интервалах поиска в целях повышения достоверности обнаружения сигнала. По накопленным выборкам в микропроцессоре МП вычисляются аналоги корреляционных функций пачек сигналов, по виду которых производится опознавание сигнала ОСМ, и определяется номер k_1 -той ячейки ОЗУ, в которой вычисленная корреляционная функция максимальна. Если эта функция превышает пороговое значение, то принимается решение об обнаружении сигнала и определяется его задержка $\tau_1=200k_1$.

На втором этапе поиска полоса пропускания ПУТ увеличивается до 20–25кГц, что способствует сохранению формы огибающей принятого импульса и производится поиск сигналов всех ОС. Точный поиск выполняется одновременно в пяти каналах АП

фиксируется k_2 – тот номер СИ₂(рис.19,б), при котором обнаруживается первое превышение сигналом на переднем фронте импульса u_c порогового значения. Во избежание пропуска этого момента импульсы СИ₂ выставляются по сигналу ν в момент $200(k_1-1)$, относительно τ_1 . В результате выполнения этапа точного поиска время задержки первого импульса ОСМ уточняется до $\tau_2=200(k_1-1)+10k_2$, где k_2 – номер СИ₂, соответствующий обнаружению сигнала (Рис.20,б). Процедура точного поиска ведомых станций выполняется параллельно с точным поиском ОСМ и отличается от описанной только установкой момента начала последовательности СИ₂ от $200k_1$ на t_{si} , где $i = X, Y, Z, W$.

Третий этап – этап точной синхронизации предусматривает определение положения характерной точки огибающей ХТО и выделение третьего периода несущей частоты на переднем фронте каждого импульса (рис. 21). Определение положения ХТО основано на формировании специального высокочастотного сигнала СПО (сигнал “продифференцированной огибающей”), нулевая точка которого соответствует ХТО. Для получения СПО применяют метод “задержки и сложения” (рис.21,а), основанный на нахождении разности между умноженным на весовой коэффициент K_b радиочастотным импульсом и его задержанной на $T_0/2$ копией, где T_0 – период несущей частоты. Можно использовать также метод “задержки и сравнения”, применяемый в прецизионных радиодальномерах. При слежении за огибающей сигнала поддерживается совмещение импульса (3) с точкой перехода СПО (2) через нулевое значение. При этом специальным стробирующим импульсом выделяется третий период несущей частоты (высокочастотная выборка), используемый для измерительных целей в АП.

Выделением третьего периода несущей частоты сигнала завершается процесс поиска, который занимает примерно 1 мин. при отношении мощностей сигнала и шума $q>1$, и около 10–15 мин при $q\approx 0,1$.

Измерение разности фаз сигналов, принятых от ОС, начинается по окончании процесса точной синхронизации. Особенность измерения заключается в импульсном характере сигнала, требующем запоминания фазы принятого сигнала до прихода следующего импульса или пачки импульсов. Пачечный характер навигационного сигнала позволяет проводить накопление результатов измерений по каждому из восьми импульсов и тем самым увеличивать точность измерений. Высокочастотная выборка поступает на цепи фазовой синхронизации (ЦФС) (рис.22).

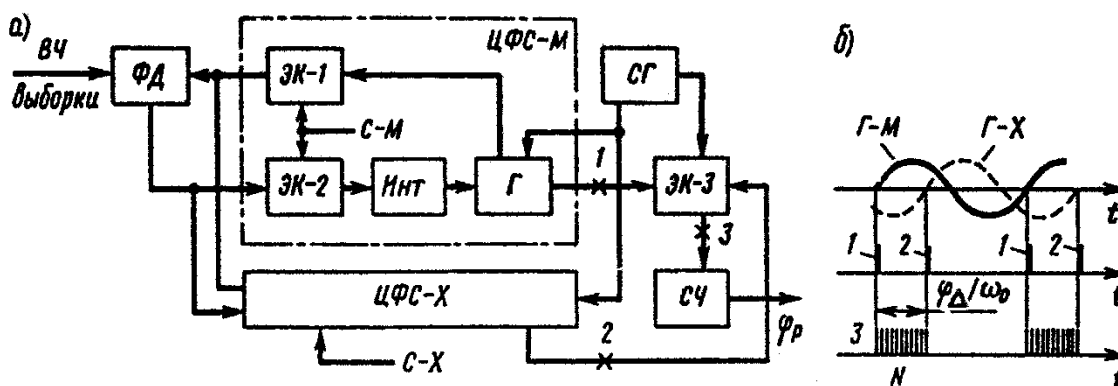


Рис. 22 Структурная схема блока определения навигационного элемента

Чувствительным к изменению фазы элементом ЦФС является, общий фазовый детектор (ФД). Отдельные ЦФС коммутируются электронными ключами (ЭК), отпираемыми стробирующими импульсами (С-М, С-Х и т.д). Положение последних по времени в результате работы цепей поиска соответствует ожидаемому моменту приема сигналов ведущей (М) или ведомых (Х,...W) станций. Сигнал ошибки фазовой синхронизации проходит через интеграторы (Инт) и используется для фазовой подстройки генератора (Г). Этот сигнал корректируется с интервалом в 1мс после приёма каждого из восьми импульсов ведущей ОС. Для слежения за фазой всех ОС цепочки необходимо соответствующее число ЦФС, в каждую из которых должен входить свой генератор (Г-М, Г-У, Г-Х и т.д.). На все Г подаются сигналы от стабильного местного генератора (СГ). Сигналы с вспомогательных генераторов ЦФС ведущей и ведомой станции используются соответственно для включения и запираения электронного ключа ЭК-3. Через этот ключ импульсы от стабильного генератора (СГ), следующие с частотой например 10 МГц ($T_{cr}=0,1\mu s$), поступают на счётчик (Сч). Количество импульсов СГ, подсчитанное счётчиком за интервал между импульсами 1 и 2 (рис.22.б), является мерой сдвига фаз $\Delta\varphi=\omega_0NT_{cr}$.

Большая длительность интервалов между соседними импульсами пачки (1мс) и между пачками импульсов ОС (несколько десятков миллисекунд) позволяют использовать один измеритель фазы. Измеритель последовательно обрабатывает сигналы ОС, выдавая результат измерения фаз φ в ОЗУ, откуда они считываются при определении разностей фаз и НЭ. Аппаратурная часть такого блока измерений упрощается за счёт усложнения программного обеспечения.

5. Точность фазовых РСДН

В аппаратуре потребителей дальномерных РСДН, работающих на частоте 10,23кГц, СКП измерения фазы составляет примерно $0,7^\circ$ ($0,002 \cdot 2\pi$), а разностно-дальномерных РСДН – около $3,6^\circ$ на частоте 100кГц. С учетом основного уравнения таких систем:

$$W = [c(2\pi f_0)^{-1}] \Delta\varphi$$

в дальномерной системе СКП определения геометрического элемента W примерно равна 60м, а в разностно-дальномерной—30м. Однако в реальных условиях погрешности определения линии положения возрастают до 1–2 и 0,1–0,3 км соответственно (меньшие значения отмечаются в дневное, а большие—в ночное время). Кроме того, точность местоопределения зависит от взаимного расположения потребителя и опорных радиостанций (геометрический фактор).

Основные источники погрешностей фазовых РСДН. Преобразование основного уравнения точности радионавигационных систем приводит к соотношению

$$\sigma_W = W \left[\frac{\sigma_c^2}{c^2} + \frac{\sigma_f^2}{f^2} + \frac{\sigma_\varphi^2}{\varphi^2} \right]^{1/2} \quad (13)$$

где σ_c , σ_f и σ_φ – средние квадратические отклонения скорости распространения радиоволн c , несущей частоты f_0 и φ_Δ .

Погрешность σ_φ зависит от уровня помех, динамических параметров потребителя и стабильности ФЧХ приемного тракта. Выражение (13) справедливо при точной синхронизации ОС и независимости возмущающих факторов.

Непостоянство скорости распространения радиоволн. Изменение проводимости и диэлектрической проницаемости поверхности, над которой распространяется электромагнитная энергия, вызывает вариации скорости c , а следовательно, появление дополнительного фазового сдвига φ_d и погрешности σ_c . На частоте 100кГц значение φ_d достигает десятых долей градуса на километр трассы. Этот фазовый сдвиг рассчитывается заранее, соответствующие поправки $\delta_1(t)$ заносятся в память бортовой ЭВМ и учитываются при измерениях. Полному устранению влияния данного фактора препятствуют случайные изменения скорости распространения, вызываемые вариациями параметров атмосферы по трассе распространения радиоволн.

В мириаметровых фазовых системах имеет место непостоянство скорости распространения радиоволн в пространственном волноводе, образованном отражающим слоем ионосферы (E или D) и поверхностью Земли. Регулярные изменения высоты H_v этого волновода при переходе от дня к ночи или при смене времен года могут быть рассчитаны заранее. Соответствующая поправка $\delta_2(t)$ вносится в память бортовой ЭВМ и учитывается при измерении фаз сигналов. Среднеквадратические значения $\delta_2(t)$ на частоте 10,2кГц составляют 3–5мкс (11 – 18° фазового сдвига). К факторам, вызывающим случайные изменения фазы в мириаметровом диапазоне, относятся хромосферные вспышки на Солнце, потоки метеоритов и т. д.

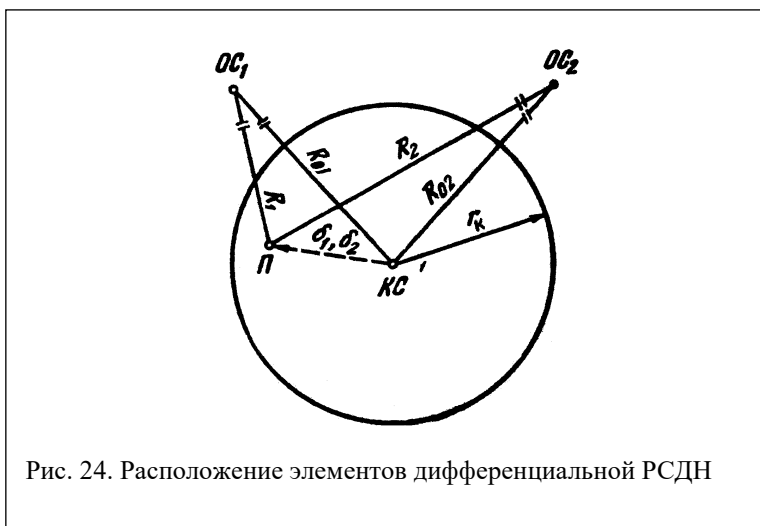
Нестабильность эталонных генераторов. Расхождение частот Δf генераторов ЭГ опорной станции и ОГ аппаратуры потребителя (см. рис.1) и приводят к погрешности σ_f , которая подлежит учету в дальномерных РСДН.

Во вступительной части третьей главы было показано, что в таких РСДН для получения высокой точности в АП требуются опорные генераторы с долговременной стабильностью не хуже 10^{-11} . Если применение таких генераторов невозможно в силу экономических или массогабаритных ограничений, следует использовать квазидальномерный или разностно-дальномерный режим работы РСДН.

Применение дифференциальных систем для повышения точности РСДН. Дифференциальные системы (см.п.3.5) позволяют повысить точность в 5–6 раз по сравнению с обычными РСДН. В дифференциальных системах поправки δ_1 и δ_2 , учитывающие особенности распространения радиоволн, измеряются на контрольной станции (КС) (рис.24), расположенной в РНТ, и передаются в реальном времени потребителю (П).

Основой дифференциального режима работы является большая площадь зоны, в которой наблюдается сильная пространственно-временная корреляция погрешностей фазовых измерений на

рабочих частотах РСДН. Радиус r_k зоны пространственной корреляции погрешностей по уровню 0,37 доходит до нескольких тысяч километров, а интервал временной корреляции составляет несколько часов.



Эффективность использования потребителем вычисленных на КС поправок наиболее высока вблизи КС. Следует иметь в виду, что преимущества дифференциального режима достигаются за счет уменьшения дальности действия системы до значения $R_{\max} < r_k$.

Кроме стандартной РСДН «Тропик» в России используются локальная (региональная) РСДН «Тропик-2П», развертываемая в конкретном регионе в виде цепочки из 3-4 станций и многочастотная разностно-дальномерная фазовая РНС «Марс-75».