

ТЕМА №1. Теоретические основы построения систем вооружения зенитных ракетных войск

ЗАНЯТИЕ № 13. Принципы построения измерителей координат, используемых в системах вооружения ЗРВ

1. Принципы построения следящих радиолокационных измерителей.
2. Дискриминаторы следящих систем.
3. Фильтрация и экстраполяция текущих оценок координат объектов.

## 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СЛЕДЯЩИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Из теории радиолокации известно, что решение задачи оценки информативного параметра сигнала (то есть измерения координат цели) приводит к операции вычисления модуля корреляционного интеграла. Следовательно, различие алгоритмов оптимального обнаружения и измерения должно заключаться только в использовании выходного сигнала приемника: при решении задачи обнаружения его необходимо сравнить с порогом, а при измерении необходимо найти такое значение измеряемого параметра, при котором выходной сигнал приемника максимален.

Максимум модуля корреляционного интеграла может быть найден путем анализа выходных напряжений многоканального приемника, каждый канал которого настроен на свое ожидаемое значение измеряемого параметра.

Например, измеритель доплеровской частоты может содержать  $h$  узкополосных фильтров, резонансные частоты которых отличаются на ширину полосы пропускания отдельного фильтра  $\Delta f_{\text{УПФ}}$ . В этом случае количество фильтров  $h$  определяется из соотношения

$$h = \frac{F_{D\max} - F_{D\min}}{\Delta f_{\text{уПФ}}},$$

где:  $F_{D\max} - F_{D\min}$  - диапазон измеряемых доплеровских частот.

При таком способе измерения измеренному значению параметра будет соответствовать номер канала приемника, в котором достигается максимальное значение корреляционного интеграла.

Другим примером реализации того же принципа может служить последовательный просмотр  $k$  разрешаемых объемов одноканальным приемником. Именно так, как правило, строят измерители угловых координат в обзорных импульсных РЛС. Принцип их действия предполагает сохранение информации о значениях корреляционного интеграла, полученных при зондировании в каждом угловом положении с дальнейшим определением максимального значения среди них (рис. 1).

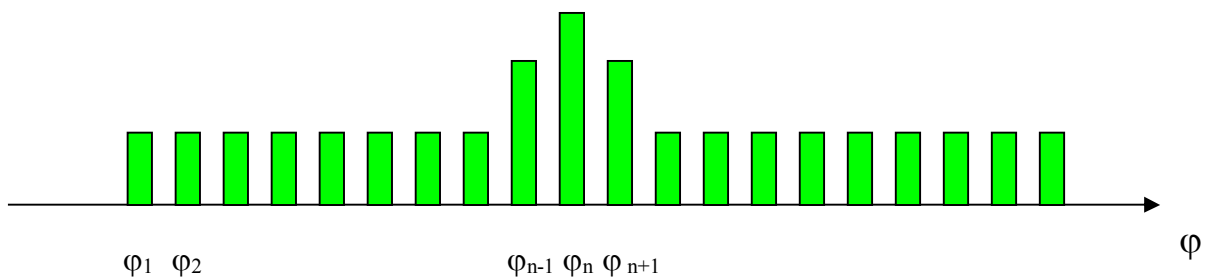


Рис. 1. Определение угловой координаты несledящим измерителем

В рассматриваемом случае значению координаты соответствует не номер канала, а номер зондирования -  $n$ .

Измерители, в которых номер канала (зондирования) соответствует определенному значению оцениваемого параметра, принято называть *неследящими*. Их использование целесообразно в тех случаях, когда требуется измерить координаты большого числа целей за минимальное время, при невысоких требованиях к точности измерения. Указанные условия характерны для работы обзорных РЛС.

Задачей РЛС управления стрельбой является измерение координат целей с высокой точностью, достаточной для наведения на них зенитных управляемых ракет. Временные ограничения в этом случае менее жесткие, так как количество обрабатываемых целей ограничено. Кроме того, в РЛС управления стрельбой может быть использована априорная информация о значениях координат искомой цели, полученная с помощью обзорной РЛС. Получение такой априорной информации принято называть *целеуказанием* (ЦУ). Источники ЦУ, способы и порядок его выдачи будут рассмотрены позднее, при изучении второй темы.

При наличии априорной информации о значении измеряемого параметра максимум корреляционного интеграла может быть найден при помощи замкнутой системы автоматического управления (САУ) по измеряемому параметру, которую принято называть *следающей системой* (СС).

Для иллюстрации процесса измерения координат в СС рассмотрим уравнение движения объекта по произвольной координате  $x$ . Учитывая, что обращение к объекту осуществляется периодически с периодом  $T$ , и ограничиваясь тремя членами полиномиального ряда, запишем:

$$x_n = x_{n-1} + x'_n \cdot T + 1/2 \cdot x''_n \cdot T^2, \quad (1)$$

где:  $x_n$  – истинное значение координаты в текущем такте  $n$ ;

$x'_n = (x_n - x_{n-1})/T$  – скорость ее изменения;

$x''_n = (x'_n - x'_{n-1})/T$  – ускорение.

*Экстраполированное* (ожидаемое) значение координаты определяется на основании данных, измеренных ранее и хранящихся в памяти СС. От состава запоминаемых данных зависит точность экстраполяции координаты. Например, если сохраняется только значение координаты (используется 1 элемент, обладающий памятью) то экстраполированное значение равно измеренному в предыдущем такте, если же сохраняется значение координаты

и скорости ее изменения (используются 2 элемента, обладающих памятью), то экстраполированное значение равно:

$$x_{n\varnothing} = \hat{x}_{n-1} + \hat{x}'_{n-1} \cdot T, \quad (2)$$

где:  $\hat{x}_{n-1}$  - *измеренное значение* координаты, хранится в памяти СС;

$\hat{x}'_{n-1}$  - *измеренная скорость* ее изменения, хранится в памяти СС.

В рассматриваемой ЗРС, СС имеют по 2 элемента памяти на каждую из измеряемых координат.

Сравнивая (1) и (2), несложно убедиться, что ожидаемое значение координаты определено с ошибкой  $\Delta x_n$ :

$$\Delta x_n = x_n - x_{n\varnothing} = (x'_n - \hat{x}'_{n-1}) T + 1/2 \cdot x''_n \cdot T^2 \approx 1/2 \cdot x''_n \cdot T^2. \quad (3)$$

Приближенное равенство в (3) обусловлено тем, что выражение  $(x'_n - \hat{x}'_{n-1})$  стремится к нулю при малых значениях  $T$  и  $x''$ .

Измеряя в текущем периоде обращения к объекту значение  $\Delta x_n$ , именуемое *сигналом ошибки* (СО), СС рассчитывает текущее измеренное значение координаты  $\hat{x}_n$ :

$$\hat{x}_n = x_{n\varnothing} + \Delta x. \quad (4)$$

Таким образом, рекуррентный алгоритм (4) измерения координат целей СС позволяет последовательно уточнять значения оцениваемого параметра по результатам измерений сигнала ошибки в каждом периоде обращения к цели.

Структура типовой СС, реализующий такой алгоритм, не зависит от измеряемой координаты (рис. 2).

В каждой СС присутствует измеритель сигнала ошибки, вычисляющий значение выражения (3), он называется *дискриминатором* и реализуется, как правило, в аналоговой форме.

Вычисление экстраполированных значений координаты в соответствии с выражением (2), текущих измеренных значений координаты в соответствии с выражением (4) и хранение измеренных значений координаты и скорости ее изменения осуществляется в *формирователе сглаженных оценок*, он реализуется, как правило, алгоритмически (программно) в специализированных вычислителях или в ЭВМ.



Рис. 2. Структура типовой следящей системы

Последним элементом в составе СС является *исполнительное устройство*, где формируется опорный сигнал для дискриминатора со значением измеряемого параметра, определяемым кодом экстраполированной координаты.

СС, представленная на рисунке 2, может быть описана и в терминах теории автоматического управления, рассмотренных в соответствующем базовом курсе.

Сигнал с выхода СС подается на ее вход для вычисления и последующей минимизации сигнала ошибки, следовательно, в

рассматриваемой замкнутой САУ использована *отрицательная обратная связь*.

В СС накапливается информация о значении координаты и о скорости ее изменения, поэтому можно утверждать, что рассматриваемая САУ обладает *астатизмом второго порядка*.

Выражения 2 – 4 описывают работу следящей системы в установившемся режиме, когда в формирователе сглаженных оценок хранится информация об измеряемой координате и ее производной. Такой режим работы называется режимом *автоматического сопровождения (АС)*.

При первом обращении к цели СС работает в режиме *поиска* (другие названия этого режима - наведение, захват). Обратная связь разомкнута, СО на выходе дискриминатора не формируется. В формирователь сглаженных оценок необходимо записать начальное значение измеряемого параметра  $x_0$  с точностью, достаточной для формирования опорного сигнала дискриминатора  $S_n(x_0)$  (рис. 3).

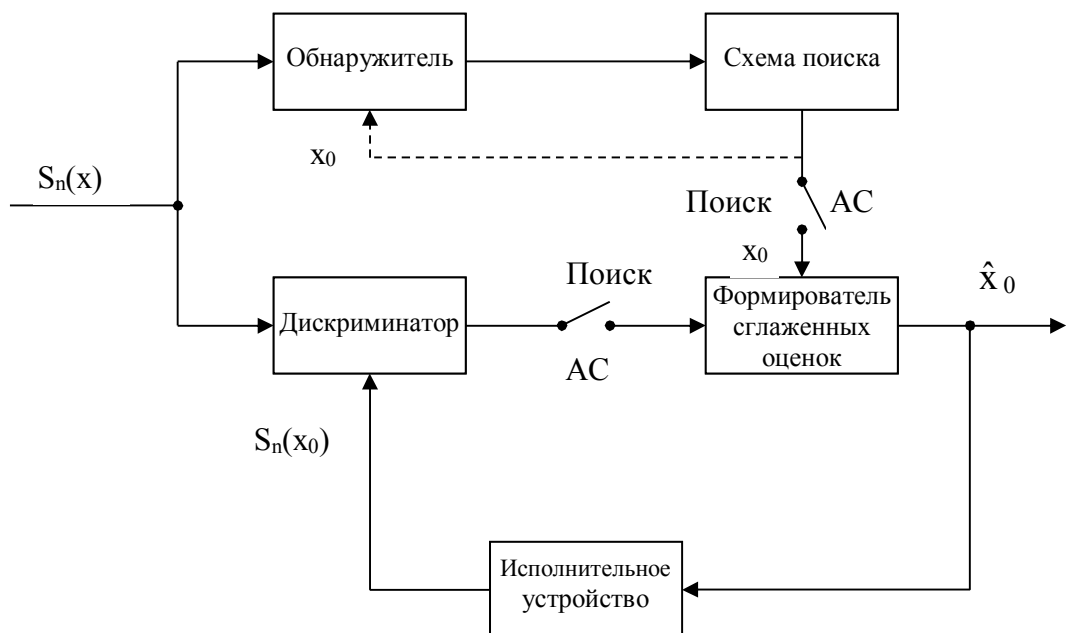


Рис. 3. Следящая система и цепи наведения

С помощью схемы поиска осуществляется перестройка обнаружителя и СС по измеряемому параметру  $x$ , до такого значения  $x_0$ , при котором достигается максимум значения корреляционного интеграла по принимаемой выборке  $S_n(x)$ . Далее цепь обратной связи замыкается и после затухания переходных процессов система переходит в режим АС.

Наведение следящих систем может производиться как вручную операторами, так и автоматически.

## 2. ДИСКРИМИНАТОРЫ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

Дискриминаторы следящих систем являются одной из основных частей САУ. Принципы их работы рассматриваются в базовом курсе теории автоматического управления. Известно, что для описания дискриминатора и анализа его свойств используют дискриминаторную характеристику (ДХ). Рассмотрим типовую ДХ (рис. 4).

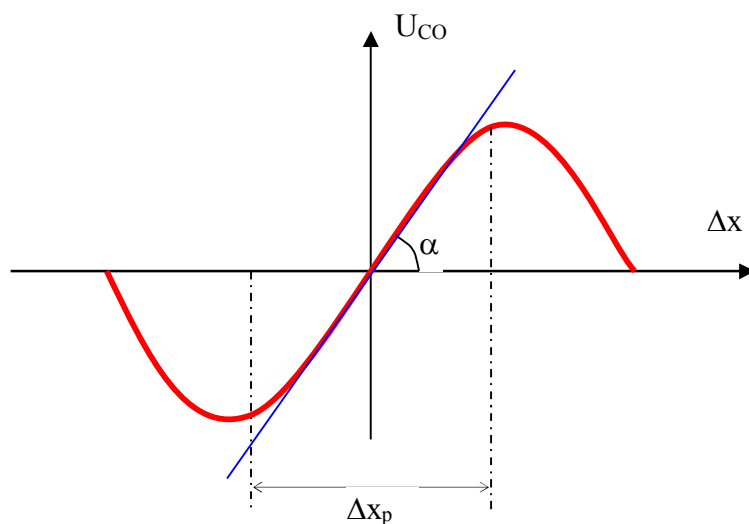


Рис. 4. Дискриминаторная характеристика

ДХ описывается двумя основными параметрами:

ширина рабочего участка (размах) -  $\Delta x_p$ ;

крутизна рабочего участка  $S = \operatorname{tg} \alpha$ .

Размах ДХ определяет максимально допустимые ошибки наведения СС.

Крутизна ДХ определяет потенциальную точность измерения координаты.

Для устранения влияния мощности измеряемого сигнала на точность измерения необходимо обеспечить выполнение условия  $S = \operatorname{const}$  при любых мощностях входного сигнала. Как правило, эта задача решается путем нормировки входных сигналов за счет работы цепей автоматического регулирования усиления.

Техническая реализация дискриминатора определяется тем, какую физическую величину предстоит измерять. Однако в основе работы всех дискриминаторов, используемых в изучаемой технике, лежат принципы суммарно-разностной обработки сигналов.

## 2.1. Принцип измерения сигнала ошибки по угловым координатам

Для измерения угловой координаты применяется метод мгновенной равносигнальной зоны. Реализация этого метода требует использования антенных систем с двумя диаграммами направленности в плоскости измерения. Максимумы диаграмм направленности смещены друг относительно друга на фиксированную величину (рис. 5), в процессе дальнейшей обработки сигналы принятые этими ДН подвергаются суммарно-разностной обработке, а сами ДН принято называть *парциальными*.



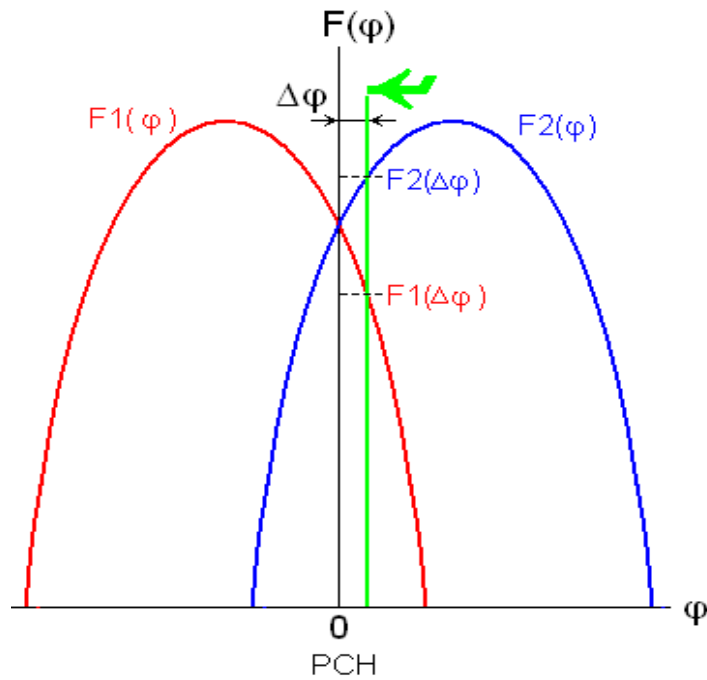


Рис. 5. ДН по  $\varphi$  в прямоугольных координатах

Под равносигнальным (РСН) понимается направление, совпадающее с линией, проходящей через точку пересечения диаграмм и начало координат, его положение в пространстве определяет значение угловой координаты. В качестве измеряемого сигнала дискриминатора (сигнала рассогласования) принимается  $\Delta\varphi$  - отклонение направления на объект от равносигнального.

Для формирования сигнала ошибки используется разностный сигнал  $U_p(\Delta\varphi)$ , формируемый путем вычитания сигнала, принятого одной парциальной ДН из сигнала, принятого другой:

$$U_p(\Delta\varphi) = U_2(\Delta\varphi) - U_1(\Delta\varphi),$$

где:

$U_1(\Delta\varphi) = U_{m1}(\Delta\varphi)\cos(\omega t + \psi)$  сигнал принятый первой ДН;

$U_2(\Delta\varphi) = U_{m2}(\Delta\varphi)\cos(\omega t + \psi)$  сигнал принятый второй ДН;

$\psi$  – начальная фаза сигналов, принятых парциальными ДН.

Амплитуды сигналов  $U_1(\Delta\varphi)$  и  $U_2(\Delta\varphi)$  зависят от значения рассогласования  $\Delta\varphi$ :

$$U_{m1}(\Delta\varphi) = K F1(\Delta\varphi);$$

$$U_{m2}(\Delta\varphi) = K F2(\Delta\varphi);$$

где:  $K$  – коэффициент передачи тракта от антенны до дискриминатора.

Несложно показать, что величина  $U_p(\Delta\varphi)$  определяется разностью амплитуд сигналов, а фаза – направлением отклонения  $\Delta\varphi$  от РСН:

$$\begin{cases} U_p(\Delta\varphi) = K |F2(\Delta\varphi) - F1(\Delta\varphi)| \cos(\omega t + \psi), & \text{при } \Delta\varphi > 0; \\ U_p(\Delta\varphi) = K |F2(\Delta\varphi) - F1(\Delta\varphi)| \cos(\omega t + \psi + \pi), & \text{при } \Delta\varphi < 0; \end{cases}$$

Разностный сигнал содержит всю необходимую информацию, но он формируется на радиочастоте. Для выделения напряжения сигнала ошибки нужно его продетектировать.

Поскольку значение сигнала ошибки зависит не только от амплитуды разностного сигнала, но и от его фазы, необходимо использовать фазовый детектор (ФД). В качестве опорного сигнала ФД целесообразно использовать суммарный сигнал:

$$U_{\Sigma}(\Delta\varphi) = U_2(\Delta\varphi) + U_1(\Delta\varphi),$$

фаза которого не изменяется в окрестностях РСН.

На выходе ФД будет формироваться напряжение сигнала ошибки:

$$\begin{cases} U_{co} = K |F2(\Delta\varphi) - F1(\Delta\varphi)|, & \text{при } \Delta\varphi > 0; \\ U_{co} = -K |F2(\Delta\varphi) - F1(\Delta\varphi)|, & \text{при } \Delta\varphi < 0. \end{cases}$$

Схема, реализующая приведенный алгоритм работы дискриминатора дискриминатор показана на рисунке 6.

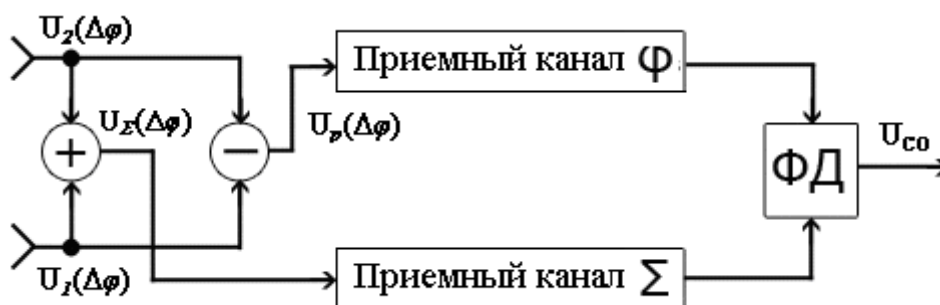


Рис. 6. Дискриминатор угловой координаты

## 2.2 Принцип измерения сигнала ошибки по дальности

В ЗРС используется импульсный метод прямого измерения дальности, основанный на измерении интервала времени  $t_3$  между моментом излучения зондирующего (запросного) и моментом приема отраженного (ответного) импульсного сигналов:

$$D = c \, t_3 / 2 ,$$

где:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Дискриминатор ССД измеряет  $\Delta t_3 = t_{3n} - t_{3n \, \varepsilon}$

где:  $t_{3n}$  – истинная задержка в  $n$  периоде обращения к цели;

$t_{3n \, \varepsilon}$  – экстраполированная задержка.

$t_{3n \, \varepsilon}$  характеризует положение пары *стробов дальности*, т.е. эталона, с временным положением которого сравнивается временное положение принятого сигнала.

Схема дискриминатора показана на рисунке 7, где УПФ обозначает узкополосный фильтр.

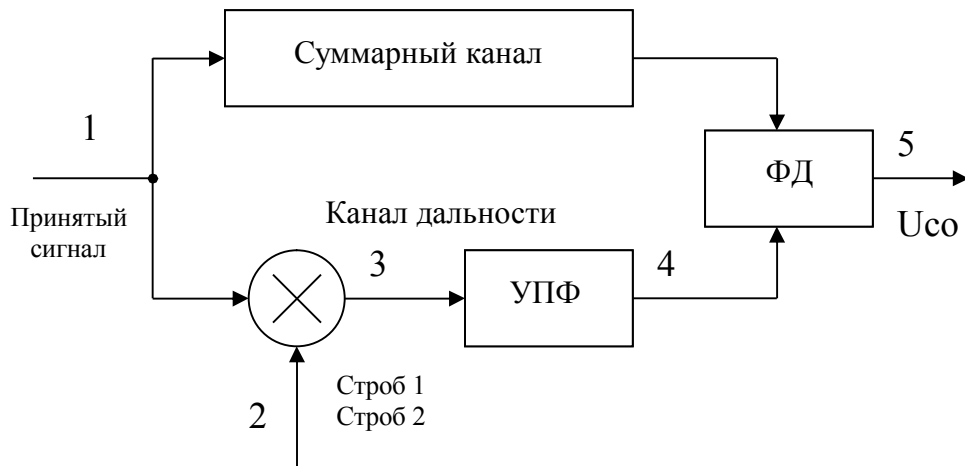


Рис. 7. Дискриминатор дальности

Для реализации принципа суммарно-разностной обработки используется пара сомкнутых стробов. Длительность каждого из них равна половине длительности принятого импульса. Начальные фазы стробов различаются на  $\pi$ . В качестве опорного сигнала ФД используется сигнал суммарного канала, в котором сдвиг фазы на  $\pi$  не вводится. Временные диаграммы иллюстрирующие работу дискриминатора приведены на рисунке 8 а,б,в.

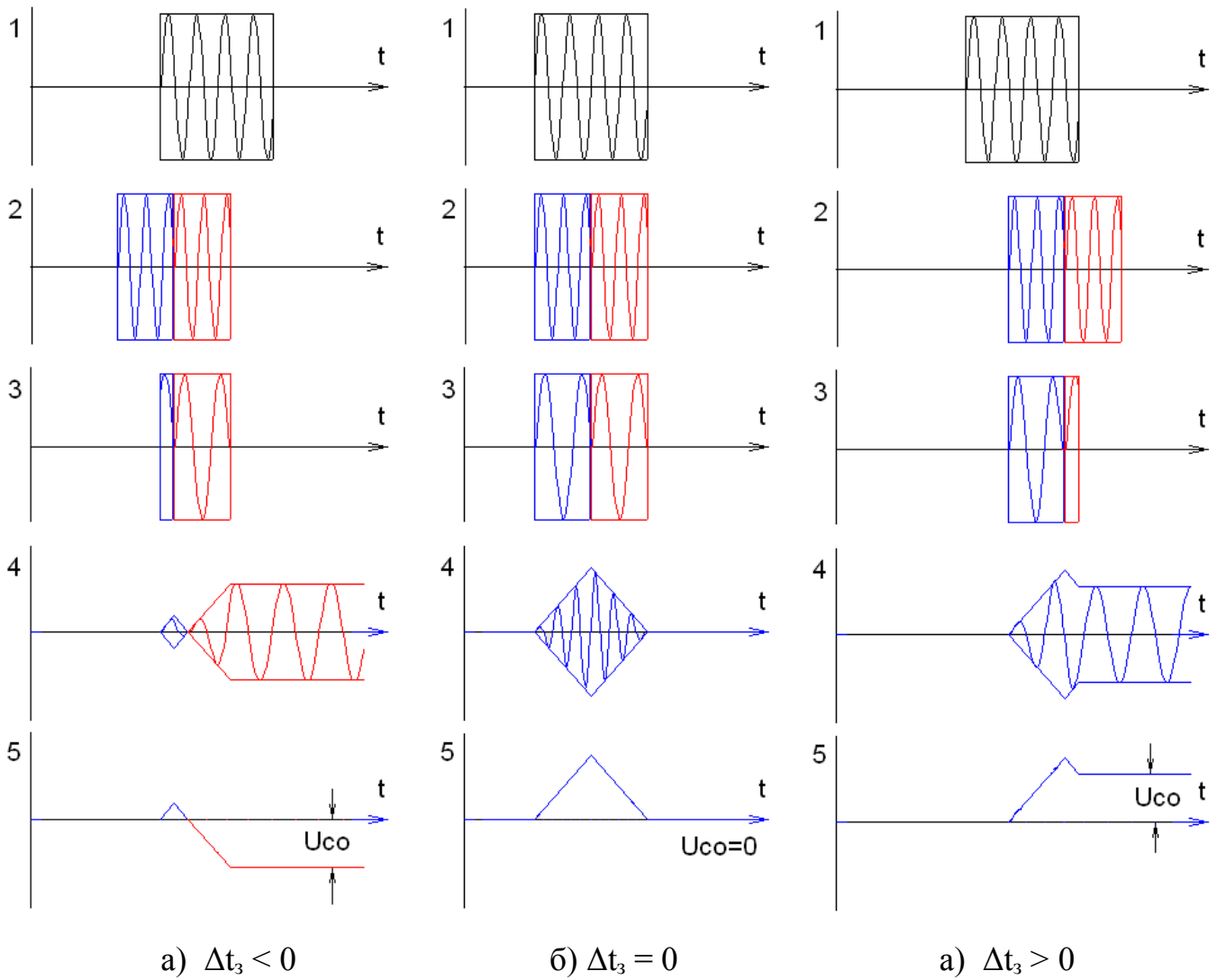


Рис. 8. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу дискриминатора дальности

### 2.3 Принцип измерения сигнала ошибки по скорости

Основным методом измерения радиальной скорости цели является использование эффекта Доплера:

$$f_{\text{ПП}} = f_{\text{изл}} \pm \Delta F_{\text{Д}};$$

$$\Delta F_{\text{Д}} = \frac{2V_r}{\lambda};$$

где:  $\lambda$  – длина волны излучаемого сигнала;

$V_r$  – радиальная составляющая скорости цели.

В качестве измерительного элемента используется классический частотный детектор с парой взаимно расстроенных полосовых фильтров. Особенностью работы данного устройства является то, что разность амплитуд сигналов, накопленных в первом ( $A_1$ ) и втором ( $A_2$ ) фильтрах, вычисляется в процессе цифровой обработки после амплитудного детектирования и преобразования обеих амплитуд в цифровой код:

$$N_{COV} = N_{A1} - N_{A2}.$$

### 3. ФИЛЬТРАЦИЯ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ТЕКУЩИХ ОЦЕНОК КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ

Движение любой реальной цели подчиняется законам аэродинамики, что позволяет представить закон изменения оцениваемого параметра на конечном интервале времени полиномиальным рядом вида (1). Количество учитываемых членов ряда определяется также из физических соображений и, как правило, ограничивается тремя, так как производные более высоких порядков принимают значения, близкие к нулевым.

Например, третья производная, характеризующая скорость изменения ускорения, не может принимать сколько-нибудь больших значений в силу того, что самолет массой несколько десятков тонн с ограниченной мощностью двигательной установки за период обращения следящей системы к цели ( $\approx 0,1$  с) не успеет заметно поменять свое ускорение.

Ограничив полиномиальный ряд тремя членами, и используя соотношения (1 – 4) можно задать систему уравнений, описывающую алгоритм работы формирователя сглаженных оценок в СС:

$$\begin{cases} x_{n\varnothing} = \hat{x}_{n-1} + \hat{x}'_{n-1} \cdot T, \\ \Delta x_n = x_n - x_{n\varnothing}, \\ \hat{x}_n = x_{n\varnothing} + K1\Delta x + x_0, \\ \hat{x}'_n = \hat{x}'_{n-1} + K2\Delta x + x'_0, \end{cases}$$

где:  $K1$  и  $K2$  – коэффициенты определяющие как устойчивость работы СС, так и ее постоянную времени, а также случайные и динамические ошибки;

$x_0$  и  $x'_0$  – начальные значения координаты и ее производной, задаваемые в режиме поиска цели.

Структурная схема цифровой следящей системы, реализующая приведенный алгоритм имеет вид, представленный на рисунке 9.

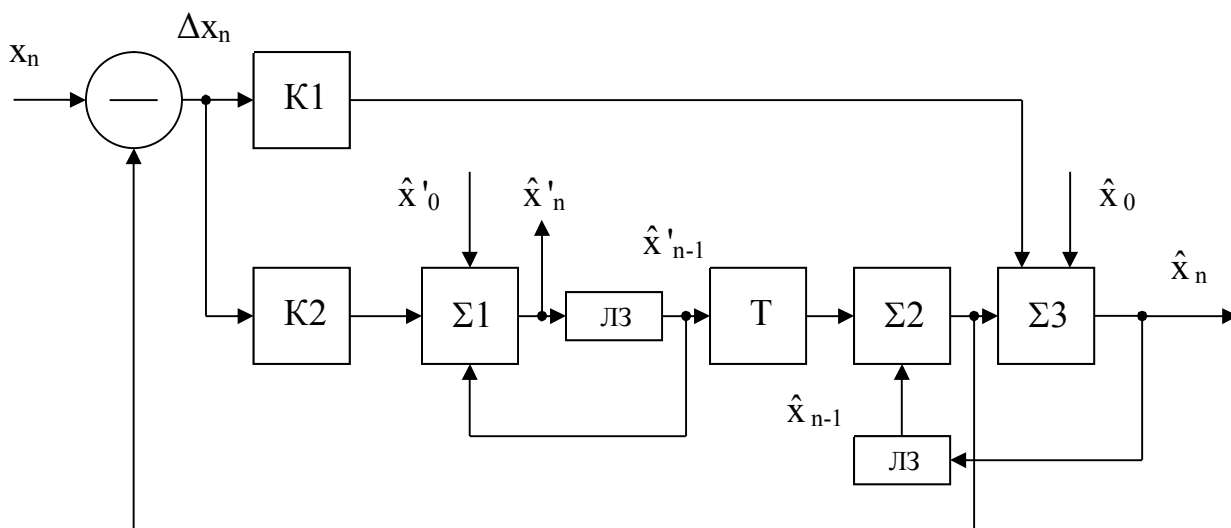


Рис. 9. Структурная схема цифровой следящей системы

На схеме дискриминатор показан как устройство вычитания. Начальные значения параметра  $\hat{x}_0$  и  $\hat{x}'_0$  вводятся в систему перед началом автоматического сопровождения и соответствуют моменту времени  $t_0$ . В дискриминаторе реализуется вычисление СО. Сформированное значение сигнала ошибки домножается на коэффициенты  $K1$  и  $K2$  поступает на фильтр оценки текущего параметра сигнала. При необходимости с выхода первого сумматора может быть снято значение оценки скорости изменения параметра  $x$ .

Полученная схема следящего измерителя представляет собой простейшую дискретную одноканальную систему автоматического управления второго порядка астатизма с отрицательной обратной связью.

В многоканальных СС для хранения полученных значений используются не линии задержки, а ячейки ОЗУ. Поскольку обращение к различным целям происходит в разные моменты времени, следящие системы по каждой из координат выполнены по схемам подобным одноканальным СС, а многоканальность достигается наличием нескольких ячеек ОЗУ (по количеству сопровождаемых целей).

### **Выводы:**

в РЛС управления стрельбой для достижения необходимой точности измерения координат целей используются следящие измерители;

структура СС включает дискриминатор, формирователь сглаженных оценок, исполнительное устройство и не зависит от измеряемой координаты;

все дискриминаторы, используемые в ЗРС, построены на принципах суммарно-разностной обработки и имеют дискриминаторные характеристики классического вида, однако их реализация определяется измеряемой координатой;

СС может работать в одном из двух режимов – поиска (вспомогательный режим) и автосопровождения (основной режим), использование режима поиска обусловлено необходимостью наводить СС на цель;

использование цифровых формирователей сглаженных оценок позволяет реализовать многоканальные СС с минимальными аппаратными затратами.

### **ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ:**

Повторить материал лекции.