

6
А-60

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

И.К. ДОРСДНОВ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

**СИНХРОНИЗАЦИЯ СКОРОСТНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В
УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ МНОГОЛУЧЕВОСТИ**

(05.304, СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ)

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

И.Л. ДОРОДНОВ

На правах рукописи

СИНХРОНИЗАЦИЯ СКОРОСТНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В
УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ МНОГОЛУЧЕВОСТИ

(05.304, системы и средства передачи информации
по каналам связи)

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

1970



В в е д е н и е

Основным препятствием на пути внедрения скоростных систем связи с временным уплотнением (последовательная передача информации) в КВ диапазоне является многолуче́вость. Однако в последнее время это препятствие успешно преодолевается как у нас, так и за рубежом с помощью адаптивной компенсации искажений канала. В системе СИИП, разрабатываемой в КЭИС, для этой цели используется испытательный импульс, предшествующий каждому циклу коротких информационных посылок.

Реализация систем типа СИИП, как и известных зарубежных систем с адаптивной компенсацией, невозможна без решения проблемы синхронизации.

Разработка новых систем синхронизации ведется все более широким фронтом. Немалая заслуга в решении различных вопросов, связанных с синхронизацией, принадлежит коллективу, возглавляемому проф. А.М. Заездным. Вместе с тем ряд принципиальных задач еще не решен. В частности, малоисследованной является проблема синхронизации систем связи типа СИИП.

Она имеет следующие аспекты.

1. Для обеспечения работы оптимальной решающей схемы приемного устройства необходимо установить интервал анализа каждой элементарной посылки и в соответствии с этим скорректировать фазу местных тактовых импульсов.

2. С учетом временного уплотнения каналов для правильного распределения принятых и регенерированных сигналов нужна информация о положении во времени начала (или конца) цикла информационных посылок и соответствующая коррекция фазы местных цикловых импульсов.

3. Для правильного определения элементов реакции канала на испытательный импульс (в системе СИИП вся реакция представляется в виде последовательности примыкающих друг к другу элементов, каждый из которых занимает интервал, равный длительности одной рабочей посылки) следует

знать интервалы времени, в которых существуют указанные полные реакции.

При посылках, длительность которых меньше максимального запаздывания между лучами (такие посылки и используются в системе СИИП), резко проявляется эффект межсимвольной интерференции. Поэтому работа устройств синхронизации происходит в весьма специфичных условиях:

1) амплитуды и фазы принимаемых высокочастотных сигналов случайно изменяются в широких пределах;

2) понятие границ между принимаемыми посылками становится условным;

3) устройство синхронизации обязано постоянно следить за соотношением мощности отдельных лучей, изменяющейся в процессе замираний, и с учетом этого управлять фазой местного тактового генератора;

4) в силу указанных выше причин формирование синхроимпульсов непосредственно из принимаемых сигналов (классический способ синхронизации) привело бы к неоднозначности решения, избежать которой невозможно без дополнительного анализа совокупности синхроимпульсов, полученных обычным путем.

Для обеспечения синхронной работы систем типа СИИП наиболее важным и первостепенным является определение положения во времени интервалов, в которых существует реакция канала на испытательный импульс. Решению этой задачи в теоретическом и практическом плане и посвящается, в основном, предлагаемая диссертация. Частично решается также задача тактовой и цикловой синхронизации.

В диссертации исследуются два пути определения временного положения реакции ($g(t)$) канала на испытательный импульс:

1) с помощью передачи специальных маркерных сигналов (синхро-сигналов), определенным образом связанных по времени с передачей испытательных импульсов;

2) по самому испытательному сигналу, если рассматривать реакцию канала на испытательный импульс как своеобразный цикловой маркер.

В первом случае при выборе того или иного маркерного сигнала необходимо обеспечить не только надежность канала синхронизации (он, в частности, не должен быть подвержен селективным замираниям), но и минимум потерь, связанных с дополнительным расходом мощности передатчика и (или) снижением скорости передачи информации.

Во втором случае основная трудность состоит в распознавании реакции канала на испытательный импульс на фоне информационных сигналов и помех. С учетом замираний в отдельных лучах принимаемые испытательные сигналы приобретают характеристики отрезков узкополосного шума. Поэтому поставленная задача может рассматриваться как задача

отыскания оптимальной системы обнаружения такого типа стохастических сигналов. Однако, поскольку данная система предназначена для синхронизации, в понятие "оптимальная" необходимо вкладывать не только надежность обнаружения, но и быстроту этого процесса.

Если поиск временного положения реакции канала на испытательный импульс трактовать как измерение времени прихода этого сигнала - T_n :

$$T_n = m \cdot T_u + \tau \quad (I)$$

где T_u - период цикла, известная величина;

m - целое число ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$), увеличивающееся на единицу по истечении каждого нового цикла с момента начала измерения T_n ;

τ - неизвестная величина ($\tau \leq T_u$), -

то поставленная задача может рассматриваться как задача отыскания оптимального способа оценки времени прихода испытательных сигналов.

В диссертации рассматриваются и сравниваются различные возможные варианты определения временного положения принятых испытательных сигналов - и с маркерами, и без них. Один из вариантов - корреляционный способ синхронизации - сопоставлен с оптимальной оценкой времени прихода сигналов методом максимума функции правдоподобия.

Вместе с решением основной задачи намечены пути повышения помехоустойчивости и эффективности собственно системы СИИП.

Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение. К третьей и четвертой главам имеются приложения.

Глава I

Методы извлечения информации о границах посылок и циклов из многолучевых сигналов

I. Под границами принимаемых посылок подразумеваются границы интервала анализа каждой элементарной посылки. Рассматривается случай, когда посылки имеют одинаковую длительность T и в информационном пакете следуют непосредственно одна за другой. Передача рабочих пакетов чередуется с передачей испытательных импульсов (ИИ), окруженных с обеих сторон защитными интервалами. Длительности обоих интервалов кратны T и выбираются из расчета, чтобы они были не меньше T_{max} - максимального взаимного запаздывания между лучами. На первом защитном интервале заканчивается переходный процесс, вызванный последними информационными посылками. На участке (ИИ) и втором защитном интервале

укладывается полная реакция $g(t)$ канала на испытательный импульс (соответствующий одной из позиций информационных сигналов). Внутри $g(t)$ по тому или иному критерию выбирается начало отсчета цикла "Н". После "Н" через интервалы T "нарезаются" границы отдельных элементов реакции $g(t)$ и далее - границы анализа (в соответствии с алгоритмом работы СИИП) каждой рабочей посылки. Под границами цикла (при приеме) подразумеваются: с одной стороны "Н", с другой - конец интервала анализа последней информационной посылки. Поскольку передача рабочих пакетов жестко привязана к испытательным импульсам, определение во времени "Н" решает одновременно задачи тактовой и цикловой синхронизации.

2. Информация об ориентировочном положении границ цикла в условиях многолучевости может передаваться путем образования на передаче в определенном месте каждого цикла (или через известное на приеме число циклов) защитных интервалов, длительность которых $\tau_{защ}$ заведомо больше τ_{max} . Пусть

$$\tau_{max} = \beta T < m T - \tau_{защ} < T_u$$

где β и m - целые числа. Если на протяжении m посылок передается одна и та же позиция сигнала, то в течение времени $(m - \beta)T$ форма принимаемого сигнала $S_z(t)$ (без учета помехи) должна оставаться неизменной. В общем случае для одночастотных систем типа СИИП

$$S_z(t) = A(t) \cos[\omega t + \varphi(t)].$$

Для указанного участка с постоянной формой $S_z(t)$ характерно:

$$\frac{dA(t)}{dt} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = 0. \quad (2)$$

Поэтому для обнаружения таких участков может быть использован амплитудно-фазовый детектор (АФД), на выходе которого появлялись бы сигналы при каждом изменении амплитуды и (или) фазы $S_z(t)$. Однако в процессе передачи информации могут случайно образоваться сигналы, на протяжении которых также будут выполняться условия (2). Для уменьшения вероятности ошибочной привязки к такому случайному сигналу необходимо или увеличить $\tau_{защ}$, или наделить истинный защитный интервал дополнительными отличительными признаками. Ими могут быть: строгая периодичность этих интервалов, заведомо определенная минимальная длительность отрезков времени $(m - \beta)T$, специфичная форма сигналов на этих интервалах. Для систем типа СИИП наиболее рациональ-

ным признано образовывать защитный интервал в виде пассивного участка при передаче информации посылками ФТ. Этот пассивный участок целесообразно формировать перед каждым ИИ, следующим с периодом T_u . Практически это сводится к незначительному увеличению длительности первого защитного интервала, который формируется как пассивный. Синхронизация в этом случае может осуществляться по совокупности 4-х цикловых признаков:

1) перед циклом сигналов ФТ расположен маркерный пассивный участок длительностью $(m - \beta)T$, на протяжении которого действует лишь флуктуационная помеха;

2) минимальная длительность этого участка задана и известна на приемной стороне;

3) оба эти условия повторяются с периодом T_u ;

4) за указанным участком всегда следует сигнал ($g(t)$), форма которого практически неизменна на протяжении многих T_u (имеется в виду, что $T_u \ll T_{з.ср.}$ - среднего периода общих замираний в канале).

Если обнаружение маркерных участков производится с помощью АФД, то первый (после такого участка) сигнал на его выходе совпадает по времени с передним фронтом новой посылки, определенно принадлежащей первому из существенных лучей. К этому моменту может быть привязано начало цикла "Н".

В работе показано, что в целях повышения помехоустойчивости приема в системах типа СИИП целесообразна двухэтапная синхронизация по циклам и тактам. Вначале определяется положение $g(t)$ и устанавливается режим слежения за временем существования $g(t)$. Второй этап синхронизации (автовыбор) заключается в нахождении начала отсчета "Н" для каждого цикла. Выбором "Н" определяется первый элемент $g(t)$ и непредсказуемая (выступающая в роли помехи) часть реакции канала на отдельную посылку. Для повышения помехоустойчивости приема необходимо обеспечить возможно большую энергию первого элемента $g(t)$, учитывая при этом вредное действие непредсказуемой части $g(t)$. В простейшем случае автовыбор может осуществляться с помощью порогового устройства, включаемого на интервале действия $g(t)$: за "Н" принимается момент, когда $g(t)$ впервые превышает некоторый уровень U_0 . Более эффективный, но и более сложный в реализованном отношении автовыбор предполагает изучение структуры всей реакции $g(t)$.

3. В диссертации показано, что при приеме многолучевых сигналов синхронизация по тактам с привязкой к тактовому ритму в любом луче может осуществляться без предварительной синхронизации по циклам,

по самим информационным сигналам. При этом используется тождественность информации в отдельных лучах.

В каждом из лучей послышки следуют с одной и той же тактовой частотой, но с различными фазовыми сдвигами. Это позволяет распределить импульсы (например, после АФД), соответствующие границам посылок в том или ином луче, по отдельным проводам. Если всего лучей, а следовательно, и задействованных проводов μ , то, выбрав наугад некоторый провод, например, i -ый, и определив, что, делая записи с этого провода, можно в других проводах получать K копий, следует признать, что в i -м проводе возникают импульсы, привязанные к тактовым моментам луча с номером $(\mu - K)$. Так можно определить, какому лучу обязаны своим происхождением импульсы - границы посылок в любом из задействованных проводов.

Получение раздельно импульсов, отражающих моменты смены позиции сигнала в каждом из лучей, позволяет осуществить в условиях многолучевости прием по границам посылок. При этом можно обойтись без зондирующего сигнала и, следовательно, повысить эффективность системы связи. Достоверность такого приема повышается с увеличением числа лучей. Для исключения обратной работы целесообразно применять разностную модуляцию.

4. В диссертации рассматриваются два способа определения временного положения $g(t)$ без использования специальных маркерных сигналов. Оба способа основаны на периодичности передачи испытательных импульсов и медленном характере общих замираний в канале, в результате чего форма сигнала $g(t)$ от цикла к циклу изменяется пренебрежимо мало. И в том, и в другом случае временному анализу подвергаются сигналы $x(t)$ после фазовых детекторов (ФД).

В первом варианте для обнаружения участков, на которых располагаются $g(t)$, сравниваются с некоторым уровнем x_0 величины

$$x_p(t) = |x(t + T_u) - x(t)|,$$

где $x(t + T_u)$ и $x(t)$ - мгновенные отсчеты напряжения после ФД, разнесенные на T_u - период цикла. Анализ сигналов $x(t)$ производится последовательно, с шагом квантования по времени $\Delta t < T$. Отличительным признаком участков с реакцией $g(t)$ является то, что на их протяжении все значения $x_p(t) \leq x_0$. На остальных участках циклов с учетом передачи информации и межсимвольной интерференции сравниваемые значения напряжения $x(t + T_u)$ и $x(t)$ отличаются в общем случае и по величине, и по знаку. При этом $x_p(t) > x_0$.

В основу второго способа, идея которого близка идее автокорреляционного приема, положено измерение и сравнение значений функции $F'(\tau, T_i)$:

$$F'_{\tau_i}(T_i) = \left| \frac{1}{T_i} \sum_{k=1}^n \int_0^{T_0} x_{\tau_i}(t - k T_u) \cdot x_k(t) dt \right|, \quad (3)$$

где $x_{\tau_i}(t - k T_u)$ - отрезок реального сигнала после ФД (сигнал + помеха), записанный в запоминающем устройстве (ЗУ) с поступлением одного из цикловых импульсов местного генератора (ГЦИ), фаза которого соответствует некоторому значению τ_i ; длительность T_0 сигнала $x_{\tau_i}(t - k T_u)$ равна длительности участка с реакцией $g(t)$; сигнал этот хранится в запоминающем устройстве и используется как опорный в течение времени $T_i = n T_u$, где n - некоторое целое число;

$x_k(t)$ - отрезок (тоже длительностью T_0) реального сигнала после ФД, поступающий в вычислительный блок через время $k \cdot T_u$ после начала записи в ЗУ сигнала $x_{\tau_i}(t - k T_u)$.

Каждая новая запись в ЗУ производится при значении фазы ГЦИ, отличающемся от предыдущего сдвигом на $\pm \Delta t$ ($|\Delta t| \ll T_0$). Из совокупности различных значений фазы выбирается такое $\tau_i = \tau_j$ (время T_i считается постоянным), при котором функция $F'(\tau)$ максимальна. Импульсом ГЦИ, разрешающие через интервалы времени $(T_i + T_u - T_0 \pm \Delta t)$ запись в ЗУ, при $\tau_i = \tau_j$ совпадают с началом $g(t)$. При этом $x_k(t)$ и $x_{\tau_i}(t - k T_u)$ отличаются только за счет помехи. Поэтому

$$F'_{\tau_j}(T_i) \approx \frac{n}{T_i} \int_0^{T_0} x_{\tau_j}^2(t) dt. \quad (4)$$

5. В ряде случаев качество связи можно однозначно оценить величиной некоторого параметра $Z(t)$, который можно измерять (таким параметром может, например, служить средняя величина модуля напряжения на интеграторе решающей схемы в момент, предшествующий сбросу). Если к тому же существует функциональная связь между $Z(t)$ и $\Delta \alpha(t)$ - величиной, характеризующей степень рассогласования приемника и передатчика по некоторому параметру $\alpha(t)$ (рассинхронизация по тактам, по несущей и т.п.), - то по результатам измерения $Z(t)$ можно судить о величине $\Delta \alpha(t)$ и соответствующим образом её изменять. Таким образом, информация о степени согласования по параметру $\alpha(t)$ может извлекаться с помощью основных блоков приемника.

Если наилучшее согласование по параметру $\alpha(t)$ соответствует максимуму $Z(t)$, то алгоритм работы решающей схемы устройства синхронизации можно записать как

$$\text{Max}_i [Z_i(t)] \quad (5)$$

где под $Z_i(t)$ подразумевается один из результатов измерения, соответствующий некоторому значению $\alpha_i(t)$. Знак подстройки $\alpha(t)$ может определяться по принципу: вначале знак $\Delta\alpha$ выбирается произвольно, а затем на основании измерения $Z(t)$. В процессе принудительного изменения $\alpha(t)$ имеем

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + a_n \cdot \Delta\alpha \quad (6)$$

где a_n - коэффициент, равный ± 1 , определяющий направление подстройки;

$\Delta\alpha$ - элементарный шаг подстройки $\alpha(t)$.

При этом

$$\begin{aligned} a_n &= a_{n-1} \quad , \text{ если } Z_{n-1}(t) \geq Z_{n-2}(t - \Delta t); \\ a_n &= -a_{n-1} \quad , \text{ если } Z_{n-1}(t) < Z_{n-2}(t - \Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

В режиме слежения параметр $\alpha(t)$ флуктуирует около значения, соответствующего максимуму $Z(t)$, т.е. устанавливается режим синхронизации, близкий к оптимальному.

Этот принцип определения направления подстройки использован для нахождения $T = T_j$ в корреляционном способе синхронизации.

6. В диссертации рассмотрен вопрос о синхронизации системы СИИП в случае использования разнесенного (по лучам) приема. Для реализации такого приема предложен следующий алгоритм работы СИИП (выражение соответствует случаю приема двухпозиционных сигналов ФТ):

$$\begin{aligned} \text{sign } i_n &= \text{sign} \left\{ \int_0^{T_n} [V_n(t) - g_{mu}(t)] \cdot g_{i,0}(t) dt + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{T_{n+B}} [V_{n+B}(t) - g_{mu}^*(t)] \cdot g_{i,B}(t) dt \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

где $\text{sign } i_n$ - знак n -го переданного информационного символа;

V_n - анализируемый на интервале T_n сигнал + помеха;

$g_{i,0}(t)$ и $g_{i,B}(t)$ - первый и последний элементы реакции канала на испытательный импульс;

$g_{mu}(t)$ - сигнал, обусловленный только посылками, предшествующими анализируемой:

$$g_{mu}(t) = \sum_{k=1}^B g_{i,k}(t - kT) \quad ;$$

индекс i элементов $g_{i,k}(t - kT)$ зависит от позиции сигналов, принятых перед анализируемой посылкой;

$$g_{mu}^*(t) = \sum_{k=0}^{k=B-1} g_{i,k}[t - (B-k) \cdot T]$$

(при определении $g_{mu}^*(t)$ имеется в виду, что цикл информационных сигналов записан в запоминающем устройстве и обработка посылок ведется в обратном направлении).

Для указанного алгоритма (8) разработана соответствующая блок-схема приемной части СИИП. С учетом того, что каждый цикл посылок обрабатывается дважды (в прямом и обратном направлении), начало отсчета цикла определяется устройством синхронизации для каждого направления обработки сигналов отдельно.

Глава II

Реализационные основы синхронизации по циклам и тактам систем типа СИИП в условиях интенсивной многолучевости

Эта глава посвящена описанию устройств синхронизации, спроектированных на основе методов, которые были изложены в главе I.

1. Рассмотрено два варианта устройства синхронизации по расширенному защитному интервалу. И в том, и в другом случае для обнаружения и фиксирования конца маркерного участка используются АФД и логическая схема, анализирующая длительность интервалов между импульсами на выходе АФД. Однако сами АФД выполнены по-разному. В одном из них используется линия задержки (ЛЗ). В сумматоре складываются два многолучевых сигнала, один из которых предварительно задержан на время $T_{зод} = (n + \frac{1}{2}) T_s$, где T_s - период в/ч колебания, а n - целое число. Сигнал на выходе АФД отсутствует, если прямой и задержанный сигналы компенсируют друг друга.

Во втором варианте используются низкочастотные квадратурные компоненты входного сигнала $Z_s(t)$ и $Z_c(t)$. Они подаются на две пары дифференцирующих цепочек, после которых включен сумматор.

2. В схеме, использующей тождественность информации в отдельных лучах, распределение импульсов-границ по разным проводам осуществля-

ется с помощью электронного кольцевого коммутатора. Сравнение случайных комбинаций импульсов, соответствующих различным лучам, производится в схеме, состоящей из запоминающего устройства, регистра сдвига и электронных ключей.

3. В устройстве, анализирующем сигналы после ФД путем измерения $x_p(t)$, значения напряжения $x(t)$ и $x(t+T_u)$ сравниваются на электрическом конденсаторе. Для повышения точности и надежности синхронизации используются обе квадратурные компоненты — $Z_s(t)$ и $Z_c(t)$. В режиме вхождения в связь первый импульс, обозначающий положение начала принимаемого информационного пакета, мгновенно подстраивает до необходимого значения фазу местного генератора управляющих импульсов. В режиме слежения осуществляется инерционная подстройка фазы. В блоке автовыбора используются амплитудный детектор и пороговое устройство.

4. При разработке схемы, реализующей корреляционный способ синхронизации, учтено, что вблизи своего максимума функция $F'(\tau)$ может иметь соседние значения, очень мало отличающиеся одно от другого (тупая вершина на графике $F'(\tau)$). Для более точного определения значения τ_j применен "метод вилки", при котором определяются границы зоны нечувствительности устройства, сравнивающего отсчеты $F'(\tau)$ и $F'(\tau \pm \Delta\tau)$ а затем находится середина этой зоны.

5. В устройстве синхронизации по совокупности циклических признаков обнаружение маркерного пассивного участка осуществляется с помощью амплитудного детектора, ограничителя и логической схемы, которая сначала производит селекцию пассивных участков по длительности, а затем проверяет, следуют ли через интервалы T_u за выбранным пассивным участком другие, очередные. Положительные результаты таких проверок фиксируются триггерным счетчиком импульсов. Нарушение периодичности следования фиксируемых пассивных участков вызывает сброс счетчика в нулевое состояние.

Глава III

Оценка помехоустойчивости и эффективности некоторых устройств синхронизации, предназначенных для обеспечения работы систем связи типа СИИП

Для большинства систем связи от устройства синхронизации прежде всего требуется точность привязки ритма работы решающей схемы к принимаемым сигналам и быстрое вхождение в синхронизм. О точности синхронизации можно судить по величине вероятности P_{dt} ошибочного фиксирования положения той или иной границы со сдвигом на Δt . Скорость вхождения в синхронизм удобно оценивать средним временем $\tau_{вх.ср.}$ с

момента начала связи до момента установления точного синхронизма.

Оба эти параметра могут быть легко определены опытным путем в процессе автономных испытаний устройств синхронизации.

При решении вопроса о том, какое (из различных возможных) устройство синхронизации целесообразно применить для данной системы связи, важно предварительно сравнить несколько устройств по тем или иным автономным параметрам.

В качестве таких параметров при сравнении разработанных для СИИП устройств синхронизации приняты отмеченные выше P_{dt} и $\tau_{вх.ср.}$.

В данной главе исследуется влияние флуктуационных помех и характера передаваемой информации на величины P_{dt} и $\tau_{вх.ср.}$ в трех различных устройствах синхронизации.

В качестве общих начальных условий для расчета приняты:

1) $T_u \ll T_{ср.з.}$, где T_u — период цикла, а $T_{ср.з.}$ — средний период общих замираний в канале;

2) низкочастотные сигналы в информационной зоне случайны и характеризуются дисперсией σ_c^2 и математическим ожиданием m_c . Параметры помехи следующие: математическое ожидание $m_n = 0$, дисперсия равна σ_n^2 , а интервал корреляции $\tau_k \ll T_u$.

Эти предположения отображают реальные условия работы системы СИИП.

Для устройства синхронизации, сравнивающего мгновенные отсчеты $x(t)$ и $x(t+T_u)$, получим:

$$P_{dt} = \left\{ \left[\Phi\left(\frac{x_0}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right) \right]^K \cdot Q \cdot (1-Q) \right\}^{n_2+1}, \quad (9)$$

$$\tau_{вх.ср.} = \frac{T_0}{P_1^2} (1-\alpha) + \frac{T_1}{P_1^2} (P_1 \cdot n_2 - 2P_1 \cdot n_2 \cdot \alpha + 1 - P_1 - \alpha). \quad (10)$$

где $\alpha = (1 - P_1)^{n_2+1}$; $P_1 = P_2 (P_3 \cdot P_4)^{n_2+1}$;

n_2 — число проверок на периодичность появления предполагаемого участка с реакцией $\varphi(t)$;

K — число отсчетов на протяжении этого участка;

Q — вероятность того, что при сравнении отсчетов, взятых из первых информационных посылок соседних циклов $x_p(t) \leq x_0$;

$\Phi\left(\frac{x_0}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right)$ — интеграл вероятностей;

- Δt - элементарный шаг квантования ($\Delta t = \frac{T}{4}$);
- $T_0 = \frac{2T_u^2}{\Delta t}$ - время анализа интервала длительностью T_u при постоянном направлении поиска;
- T_1 - время анализа участка, равного по длительности $\kappa \cdot \Delta t$;
- P_2 - вероятность того, что в процессе анализа информационных участков в $2 \left(\frac{T_u}{\Delta t} - \kappa \right)$ циклах не произойдет ни одного ложного фиксирования границы информационного пакета;
- P_3 - вероятность того, что в процессе K испытаний участков с реакцией $g(t)$ не окажется ни одного результата, когда $x_p(t) > x_0$;
- P_4 - вероятность того, что в процессе последовательных испытаний по окончании второго защитного интервала сразу же будет получен результат $x_p(t) > x_0$.

Расчет тех же параметров для устройства, реализующего корреляционный способ, показал, что

$$P_{\Delta t} \approx \left(\frac{1}{2}\right)^n, \quad \tau_{вх.ср} \approx \frac{T_u^2}{2\Delta t} (n+1), \quad (II)$$

где n указывает число циклов, на протяжении которых используется один и тот же опорный сигнал $x_{r_i}(t - \kappa T_u)$, записанный в ЗУ.

При расчете устройства синхронизации по совокупности цикловых признаков случайные сигналы на выходе амплитудного детектора аппроксимировались последовательностью примыкающих друг к другу прямоугольных импульсов одинаковой длительности T_1^* .

Показано, что

$$P_{\Delta t} = P_1 (\rho_0^{n_1} \cdot \rho \cdot q)^{n_2+1}, \quad \tau_{вх.ср} = T_u \left(n_2 + \frac{1}{P_4} \right), \quad (I2)$$

- где n_2 - число проверок на периодичность;
- n_1 - ближайшее целое число, определяемое из отношения длительности пассивного участка к T_1^* ;
- P_1 - вероятность того, что при анализе информационного участка не будет обнаружен пассивный участок длительностью $\tau \geq n_1 T_1^*$ (вывод формулы для вероятности типа P_1 содержится в приложении к 3-ей главе;

$$\rho = P(E_a < U_0); \quad q = P(E_0 \geq U_0); \quad \rho_0 = P(E_n < U_0);$$

$$q_0 = P(E_n \geq U_0);$$

- U_0 - пороговый уровень ограничителя;
- E_a - амплитуда прямоугольных импульсов на участке активного сигнала;
- E_n - амплитуда прямоугольных импульсов на пассивном участке;

$$P_4 = P_1 (\rho_0^{n_1} \cdot q)^{n_2+1}$$

В работе получено выражение для нахождения оптимального порога ограничения U_{00} :

$$\frac{U_{00}}{\sqrt{2} \sigma_n} = \sqrt{\frac{(h^2+1) \ln(h^2+1)}{h^2}}, \quad (I3)$$

где $h^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_n^2}$; σ_c^2 - дисперсия случайного сигнала.

На основании полученных формул произведен сравнительный расчет $P_{\Delta t}$ и $\tau_{вх.ср}$ для указанных устройств синхронизации применительно к конкретным условиям приема.

Этот расчет позволяет сделать следующие выводы.

1. Устройства синхронизации со специальными маркерными сигналами (УС₁) - даже с применением проверки на периодичность появления маркерных сигналов - обеспечивают существенно меньшее $\tau_{вх.ср}$, чем УС₂ (без специальных маркерных сигналов), в которых не производится проверка периодичности предполагаемых $g(t)$.

2. В УС₂ введение проверки на периодичность настолько увеличивает $\tau_{вх.ср}$, что эта проверка практически оказывается недопустимой или может проводиться лишь с большими ограничениями.

3. С использованием проверки на периодичность УС₁ всегда могут обеспечить меньшую вероятность ошибочного фиксирования начала цикла, чем УС₂.

4. Влиянию флуктуационных помех менее всего подвержено УС₂ на основе корреляционной техники (это не означает, что данное устройство обеспечивает наименьшую вероятность ошибочного фиксирования начала цикла).

5. В отличие от УС₂ качество работы УС₁ не зависит от характера передаваемой информации в рабочем пакете.

Результаты макетирования и испытаний некоторых устройств синхронизации в лабораторных условиях и на линиях связи

Испытаниям последовательно подвергались следующие устройства синхронизации: 1) по расширенному защитному интервалу; 2) сравнивающее мгновенные отсчеты напряжения после ФД; 3) по совокупности цикловых признаков. Первое устройство (выполненное в двух вариантах) испытывалось с имитатором двухлучевого (без замираний) канала (ИДК) и на линии связи Иркутск-Куйбышев. Второе - с имитатором КВ канала ИКРК-I "Эфир" и имитатором ИРК-2. Третье - с имитатором ИРК-2 и на линии Ташкент-Куйбышев.

Указанные устройства синхронизации работали в составе систем, представляющих собой различные модификации СИИП.

В диссертации приведены методика испытаний и выдержки из протоколов, характеризующие результаты испытаний.

Качество связи и синхронизации контролировалось в основном по записям регенерированного сигнала и сигналов синхронизации СИИП на ленте фототелеграфного аппарата ФТАП-2П. Образцы этих записей приведены в приложении к 4-ой главе.

В некоторых случаях качество работы СИИП контролировалось также по количеству ошибок, возникающих при передаче серий из одной и той же буквы от передающего телеграфного аппарата СТА-2М к приемному, - по ленте приемного аппарата.

При испытаниях на линии связи запаздывание лучей иногда достигало 2 мсек, но чаще составляло величину порядка $0,9 + 1,3$ мсек, т.е. примерно $1,5 + 2T$; число лучей доходило до $2 + 3$. Замирания сигналов в канале характеризовались периодом порядка нескольких секунд.

При испытаниях с ИРК-2 устанавливались режимы работы, имитирующие:

1) идеальный канал;

2) двухлучевой канал с релеевскими замираниями каждого из лучей.

При этом запаздывание между лучами устанавливалось больше T - длительности элементарной посылки;

3) однолучевой канал с релеевскими замираниями.

Для этих трех режимов представлены графики теоретической и экспериментальной зависимости вероятности ошибки P от k^2 .

В главе IY диссертации приведено также описание специального стенда, спроектированного и построенного для автономных испытаний

устройств синхронизации. Он, в частности, позволяет измерять параметры $P_{\Delta t}$ и $T_{вх.ср}$. Приведены результаты испытаний на этом стенде устройства синхронизации по совокупности цикловых признаков.

Лабораторные и линейные испытания построенных устройств синхронизации подтвердили основные теоретические предпосылки.

Подтверждена перспективность использования в системе СИИП устройства синхронизации по совокупности признаков.

Все упомянутые устройства синхронизации выполнены в виде типовых ячеек, принятых в конструкции СИИП.

Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Предложено использовать для синхронизации маркерные сигналы, не контрастно выделяющиеся на фоне совокупности информационных сигналов. Выявлены преимущества и недостатки применения таких сигналов. Показана целесообразность и возможность использования одновременно нескольких цикловых признаков.

2. Показано, что факт тождественности информации в отдельных лучах может быть использован для синхронизации по тактам и приема по границам посылок без зондирующего сигнала.

3. Разработано два способа последовательного временного анализа принимаемых случайных сигналов с целью определения положения среди них периодически повторяющегося участка сигнала: один из способов основан на сравнении мгновенных отсчетов последетекторных сигналов, второй - на использовании корреляционной техники. Показано, что корреляционный способ синхронизации может быть отнесен к разряду оптимальных методов оценки времени прихода сигналов.

4. Показано, как метод максимизации (или минимизации) некоторого параметра, косвенно характеризующего степень согласования по частоте или фазе, может быть применен при временном анализе сигналов для синхронизации по циклам, по тактам, а также для согласования частоты и фазы опорного колебания синхронного детектора с принимаемым сигналом. Установлена принципиальная возможность извлечения информации о степени согласования по тому или иному параметру синхронизации (частоты, фазы) с помощью основных блоков приемника, без формирования синхроимпульсов из принимаемых сигналов.

5. В качестве меры для повышения надежности информации о положении границ посылок и циклов при временном анализе сигналов предложена проверка на периодичность появления этой информации. Показано, как такая проверка может быть реализована.

6. Получены формулы для расчета наиболее важных характеристик разработанных устройств синхронизации - среднего времени вхождения в синхронизм и вероятности ошибочного фиксирования положения искомой границы - со сдвигом на ту или иную величину. Для устройства синхронизации по совокупности признаков получено соотношение для оптимального порога ограничения.

Проведено теоретическое исследование влияния флуктуационных помех и характера передаваемой информации на точность синхронизации и среднее время вхождения в синхронизм - в трех устройствах синхронизации.

7. Разработаны функциональные и принципиальные схемы основных узлов и устройств, реализующих полученные в диссертации алгоритмы.

8. Построены и экспериментально проверены два (различные по принципу действия) устройства синхронизации по расширенному защитному интервалу, устройство синхронизации, сравнивающее мгновенные отсчеты напряжения после фазового детектора, и устройство синхронизации по совокупности цикловых признаков.

9. Спроектирован и построен стенд для автономных испытаний устройств синхронизации, позволяющий количественно оценивать среднее время вхождения в синхронизм и точность синхронизации, обеспечиваемые тем или иным конкретным устройством.

Попутно с решением задач, касающихся непосредственно синхронизации, выявлены некоторые возможности усовершенствования собственно системы СИИП.

1. Показано, что поскольку испытательный сигнал в системах типа СИИП может формироваться в виде различных комбинаций посылок, то помимо своего прямого назначения - изучения свойства канала - он может быть использован и для передачи с избыточностью информации от дополнительного источника или для проверки информации в рабочем пакете.

2. Предложен способ повышения помехоустойчивости систем типа СИИП, основанный на разнесении по лучам. Получен соответствующий алгоритм и показана возможность его реализации.

Основные результаты диссертации докладывались автором на научно-технических конференциях КЭИС 1966-1970 г.г., на юбилейной XXV Всесоюзной научной сессии НТОРЭС им. А.С.Попова (1969г.) в г. Москве, на II выездном заседании секции ТПИ и СС Центрального правления НТОРЭС им. А.С.Попова (1969г.) в г. Куйбышеве, на научно-технической конференции ("Статистическая радиотехника") городов Поволжья, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Ленина, а также изложены в следующих работах.

1. Н и к о л а е в Б.И., Д о р о д н о в И.Л. Вопросы синхронизации КВ систем связи в условиях интенсивной многолучевости. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР, Куйбышев, 1967.

2. Д о р о д н о в И.Л. О возможности синхронизации дискретных систем связи вариационным методом с использованием блоков приемника для контроля синхронизации. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР. Куйбышев, 1968.

3. Д о р о д н о в И.Л., Н и к о л а е в Б.И. Способ синхронизации на основе анализа структурных свойств сигнала. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР. Куйбышев, 1968.

4. Д о р о д н о в И.Л. О корреляционном способе синхронизации системы КВ связи в условиях интенсивной многолучевости. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР. Куйбышев, 1969.

5. Д о р о д н о в И.Л. О помехоустойчивости и эффективности некоторых систем синхронизации, обеспечивающих прием в условиях интенсивной многолучевости. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР. Куйбышев, 1969.

6. Д о р о д н о в И.Л. О цикловой синхронизации по совокупности признаков. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР, ч. I (Сборник докладов II-го выездного заседания секций ТПИ и СС Центрального правления НТОРЭС им. А.С.Попова.). Куйбышев, 1970.

7. Д о р о д н о в И.Л. О повышении помехоустойчивости приема дискретных сообщений в каналах с эхо-сигналами. Труды учебных институтов связи, вып. 51 (в печати).

8. Д о р о д н о в И.Л., Н и к о л а е в Б.И. Результаты макетирования в КЭИС скоростной коротковолновой системы связи СИИП-2Ф. Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР, ч. I. (сборник докладов II выездного заседания секций ТПИ и СС Центрального правления НТОРЭС им. А.С.Попова). Куйбышев, 1970.

Часть материала изложена в научно-технических отчетах кафедры ТПС КЭИС.

Е000317, зак. 375, тир. 150 экз., печ. лист. I, 25, подписано к печати

20.XI.70 г.

Куйбышевский электротехнический институт связи, Льва Толстого, 23.