Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.391.1:621.39

Ле
Нгуен Лонг

Оценка временного положения информационного сигнала в системах многоканального комбинационного уплотнения

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 7-06-0713-03 «Радиосистемы и радиотехнологии»

Научный руководитель
КАРПУШКИН Эдуард Михайлович
Доцент кафедры ИРТ БГУИР
Кандидат технических наук, доцент

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

Широкополосными (сложными, шумоподобными) сигналами (ШПС) называют такие сигналы, у которых произведения эффективной ширины спектра F на длительность T много больше единицы. Широкополосными сигналы иногда называют сложными в отличие от простых сигналов (например, прямоугольные, треугольные и т.д.).

Широкополосные сигналы (ШПС) успешно используются в радиотехнических системах радиолокации, радионавигации и передачи информации. Основным препятствием к более широкому использованию ШПС является необходимость синхронизации устройств оптимальной обработки ШПС на приемной стороне.

Широкополосные сигналы, используемые для передачи цифровой информации, отличаются тем, что их полоса частот намного больше, чем полоса цифровой информации. Большая избыточность, свойственная широкополосным сигналам, требуется для преодоления высоких уровней интерференции, возникающих при передаче цифровой информации по некоторым радио- и спутниковым каналам. Прямая последовательность (ПП) и скачка частоты (СЧ) являются наиболее общими формами широкополосных сигналов, используемых на практике. Однако можно использовать комбинирование методы для формирования ШПС.

Оптимальная оценка параметров радиосигнала заключается в синтезе структуры, наилучшим образом выделяющей информационный параметр (или несколько параметров), и количественной характеристике качества работы синтезированной структуры. Параметры радиосигнала можно разделить на энергетические (амплитуда, длительность) и неэнергетические (фаза, частота, время запаздывания).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Широкополосные сигналы (ШПС) оптимальны благодаря высокой помехоустойчивости и эффективности при низком SNR. Расширение спектра распределяет энергию сигнала в широкой полосе, уменьшая влияние узкополосных помех и многолучевости. Благодаря этому системы широкополосной связи достигают оптимальной надёжности в каналах с большими потерями и помехами, обеспечивая эффективное использование полосы частот и энергии.

Поскольку широкополосные сигналы требуют оптимальной обработки, приёмная сторона обязательно должна знать время прихода полезного сигнала. Следовательно, синхронизация включает в себя оценку времени прихода информационного сигнала и слежение за его временным положением. Время, необходимое для процесса синхронизации, в общем случае снижает скорость передачи информации. Именно поэтому задача синхронизации является

актуальной задачей в системах широкополосной связи.

Степень разработанности проблемы

Синхронизация является неотъемлемой частью современных широкополосных систем связи. Основной целью является разработка эффективного алгоритма временной синхронизации принимаемого широкополосного сигнала. В отечественных и зарубежных источников уделается внимается.

В данной работе анализируется последовательный и скользящий методы поиска. В частности находится среднее время поиска в зависимости от отношения сигнала/шум и длины псевдослучайной последовательности.

Цель и задачи исследования:

– Синтез и анализ устройств синхронизации, включающих этапы поиска по временному положению и слежение за временым положением.

– Исследование методов синхронизации по времени в широкополосных системах связи.

– Потенциальная оценка качества приема для различных методов синхронизации.

Объект исследования: схема поиска и слежение за временном положением.

Предмет: системы синхронизации

Теоретическая и методологическая основа исследования:

В основу диссертации легли результаты известных исследований белорусских и зарубежных специалистов в области широкополосные системы связи и сигналы, оптимальный прием радиосигналов.

Все расчеты и полученные результаты подтверждались экспериментальными данными с помощью собранного опытного образца системы.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна:

– Даны оценки среднего времени поиска в зависимости от отношения мощности сигнала к мощности шума и длины псевдослучайной последовательности.
– Даны результаты компьютерного моделирования процесса синхронизации

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Показан обзор литературы по широкополосным системам (ШПСС), который включает применение широкополосных сигналов в системах связи. Методы расширения спектра, основные принципы построения широкополосных систем связи, синхронизация в широкополосных системах.
- Дан анализ поиска по временному положению широкополосных сигналов в системах передачи цифровой информации.Рассмотрены достоинства и недостатки временного поиска.
- Дан анализ оценки точности слежения по временому положению. Представлены результаты компьютерного моделирования алгоритмов поиска.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов:

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 61-й и 62-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР.

Публикации:

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 6 страниц.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассматриваются Обзор литературы по широкополосной системе связи.

Во второй главе рассматриваются синтез устройств синхронизации в системых шпс.

В третьей главе рассматриваются методы временной синхронизации в системах с псевдослучайными сигналами.

В **четвертой главе** представлены результаты компьютерного моделировании алгоритмов поиска.

Общий объем диссертационной работы составляет 78 страниц. Из них 60 страниц основного текста, 42 иллюстраций, список собственных публикаций соискателя из 3 наименований..

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено широкополосные сигналы, у которых произведения активной ширины спектра F на длительность T много больше единицы. Это базой сигнала B. Повышение базы в ШПС достигается путем дополнительной

модуляции (или манипуляции) по частоте или фазе на времени длительности сигнала. Кроме того, показаны применение в широкополосных системах связи, временную синхронизацию на приеме относительно принимаемого широкополосного сигнала.

В первой главе рассматриваются обзор литературы по широкополосным системам (ШПСС), который включает помехоустойчивость ШПСС, основные виды ШПС, скрытность системы связи принципы оптимальной фильтрации. оптимальный фильтр ШПС, синхронизация в широкополосных системах.

Помехоустойчивость ШПСС, одним из основных назначений систем, связи с ШПС является обеспечение надежного приема информации при воздействии мощных помех, когда отношение сигнал-помеха на входе приемника ρ^2 может быть много меньше единицы . Необходимо еще раз

отметить, что приведенные соотношения строго справедливы для помехи в виде гауссовского случайного процесса с равномерной спектральной плотностью мощности («белый» шум).

Скрытность системы связи - это способность противостоять обнаружению и измерению параметров. Скрытность – понятие очень емкое, так как включает в себя большое множество особенностей обнаружения ШПС и измерения их параметров. Поскольку обнаружение ШПС и измерение параметров возможны при различной первоначальной осведомленности (априорной неопределенности) о системе связи, то можно указать только основные соотношения, характеризующие скрытность

Таким образом, чем шире спектр ШПС и чем больше ею база, тем выше как энергетическая, так и параметрическая скрытность. Для борьбы с радиоразведкой в помехозащищенных системах связи применяют также смену ШПС. Частота смены ШПС, их выбор из некоторого ансамбля (системы сигналов) определяется многими требованиями к системе связи и не может

быть однозначно определен. Однако полагают, что число сигналов в системе (или объем системы сигналов) должно быть много больше базы ШПС.

Следовательно, использование ШПС повышает помехоустойчивость и скрытность системы связи, т. е. еѐ помехозащищенность. Как следует из материалов зарубежной печати, ШПС используют в спутниковых системах связи, в авиационных системах связи, в радиорелейных линиях, в спутниковых навигационных системах. Повидимому, применение ШПС в помехозащищенных системах связи будет расширяться.

Для сигнала с длительностью T и шириной полосы W размерность пространства сигналов приблизительно равна $2WT$. Размерность диапазона

можно повысить за счет увеличения W (расширение спектра) или T (расширение временного диапазона или переключение временных интервалов). При расширении спектра сигнал расширяется в частотной области. При переключении временных интервалов сообщению, передаваемому со скоростью R, выделяется более длительное время, чем необходимо для передачи данных с помощью обычного метода модуляции. В течение этого времени данные передаются отдельными пакетами согласно требованиям кода. Можно сказать, что при переключении временных интервалов сигнал расширяется во временной области. В обоих случаях создание преднамеренных помех будет осложнено тем, что область, используемая сигналом в каждый момент времени, будет неопределенной [3].

Широкое применение в современных РТС с ПС-сигналами нашли бинарные ПСП. Из множества классов бинарных ПСП ниже рассматриваются два класса, имеющие хорошие спектрально-корреляционные характеристики и отличающиеся простотой формирования.

Псевдослучайные бинарные последовательности применяются для различных целей. Наиболее распространенными являются: защита передаваемых данных от несанкционированного доступа; разравнивание спектра сигнала и повышение надежности синхронизации приемника с источником передаваемых по линии данных; формирование широкополосных сигналов.

М - последовательности [5] – это класс ЛРП максимального периода (отсюда и название М – максимальное) с основанием $p = 2$ удовлетворяющий рекуррентному правилу

$$a_i = c_1 a_{i-1} + c_2 a_{i-2} + \ldots + c_n a_{i-n}, \qquad (1.13)$$

где $c_i \in \{0,1\}$, n – порядок, определяющий память последовательности; при $a_i \in \{0,1\}$ – умножение логическое, а сложение – по модулю 2.

Задаваясь начальной комбинацией из n символов по правилу (1.13), можно формировать М-последовательность. ЛРП описываются полиномами n-й степени вида

$$c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \ldots + c_n x^n = 0$$

Четверично-кодированные последовательности (ЧКП), в [7,8] их называют Д-кодами, относятся, как и М-последовательности, к классу бинарных ПСП. В отличие от М-последовательностей семейство ЧКП формируются нелинейным способом и имеют значность $N = 2k$, где k= 1,2,3....

Наиболее наглядно процесс формирования ЧКП можно проследить, проанализировав порождающее выражение

$$A_j^{\,k} = \overline{\sum_{i=1}^{K-1} Bi^{(k+1)-i} B_{i+1}^{\,k-i} + \sum_{i=1}^{K} X_i^{\,j} B_i^{(k+1)-i}} \qquad (1.18)$$

где $A_j^{\,k} = (a_1, a_2, ..., a_N)$ условная запись одиночной ЧКП длительности $T = N\tau_0$ порядка k номера j, символы которой $a_i \in \{0,1\}$; $B_i^{(k+1)-i}$ – функция Радемахера (меандровая функция), определяемая на длительности T с номером i и порядком $[(k+1)-i]$; $X_i^{\,j} \in \{0,1\}$ значение I-го разряда номера последовательности $A_j^{\,k}$ представленного в двоичном виде (для ЧКП порядка k номер определяется k-разрядным двоичным числом).

Основные принципы известных в настоящее время методов передачи информации при помощи ШПС могут быть сформулированы следующим образом [9, 10, 11]:

- 1. Расширение спектра сигнала - это способ передачи, при котором сигнал занимает полосу частот более широкую по сравнению с полосой, минимально необходимой для передачи информации.
- 2. Расширение полосы частот, занимаемой спектром сигнала, осуществляется независимо от передаваемого сообщения с помощью того или иного метода модуляции (манипуляции) или кодирования.
- 3. Для последующего сжатия спектра сигнала по полосе частот и восстановления переданного сообщения при приеме используется тот же метод модуляции (манипуляции) или кодирования, что и при передаче.
- 4. Восстановление при приеме переданного сообщения невозможно без синхронизации модулирующих и демодулирующих функций или кодирующих и декодирующих последовательностей.

В системах расширенного спектра (DS и FH) для успешной демодуляции принятого сигнала приемник должен обладать *синхронизированной* копией расширяющего или кодового сигнала. Процесс синхронизации сгенерированного приемником расширяющего сигнала и полученного сигнала расширенного спектра обычно проходит в два этапа. На первом этапе два сигнала приводятся в *грубое* соответствие друг другу (процесс *первоначальной синхронизации).* В ходе второго этапа обработки *(этап сопровождения)* с помощью контура обратной связи последовательно выбирается сигнал, наиболее *точно* соответствующий полученному.[3]

Во второй главе рассматриваются синтез устройств синхронизации в системых ШПС

В колебании x(t) = S(t,τ) + n(t), 0≤t≤T, полезный сигнал S(t,τ) = S0(t - τ)cos(ω0t + φ) является функцией от временного положения τ.Так как огибающая сигнала – медленно изменяющаяся функция по сравнению с несущей частотой ω0 , то оценку временного положения сигнала можно проводить, анализируя

сигнальную функцию огибающих сигналов:

$$y_c(t) = \frac{2}{N_0}\int_0^T S_0(t-\tau_0)S_0(t-\tau)dt$$

Вторая производная сигнальной функции (1) по информационному параметру τ при $\tau = \tau_0$

$$y_c^{"}(t) = \frac{2}{N_0}\int_0^T S_0(t-\tau_0)\left[\frac{d^2 S_0(t-\tau)}{d\tau^2}\right]_{\tau=\tau_0} dt$$

Выразим $y_c^{"}(t)$ через параметры спектральной функции огибающей, воспользовавшись обратным преобразованием Фурье:

$$y_c''(\tau_0) = -\frac{2}{N_0}\frac{1}{4\pi^2}\int_0^\tau \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 S(j\omega)S(j\Omega)e^{j\omega(t-\tau_0)}e^{j\Omega(t-\tau)}d\omega d\Omega dt$$

$$= -\frac{2}{N_0}\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\Omega^2\left|S(j\Omega)\right|^2 d\Omega = -\frac{2E}{N_0}\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\left|S(j\Omega)\right|^2\Omega^2 d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty}\left|S(j\Omega)\right|^2 d\Omega} = -\frac{2E}{N_0}F_{ЭК}^2$$

Можно синтезировать и следящую оценку временного положения, если приравнять к нулю производную от натурального логарифма функционала правдоподобия по измеряемому параметру:

$$\frac{d\ln F(\hat{\tau})}{d\hat{\tau}} = \int_0^T x(t)\frac{ds(t-\hat{\tau})}{d\hat{\tau}}dt = 0$$

Или

$$\int_0^T x(t)\left[S(t-\hat{\tau}+\Delta) - S(t-\hat{\tau}-\Delta)\right]dt = 0.$$

В исследование были получены оценка временного положения, ее дисперсия и флуктуационная точность измерения временного задержки.

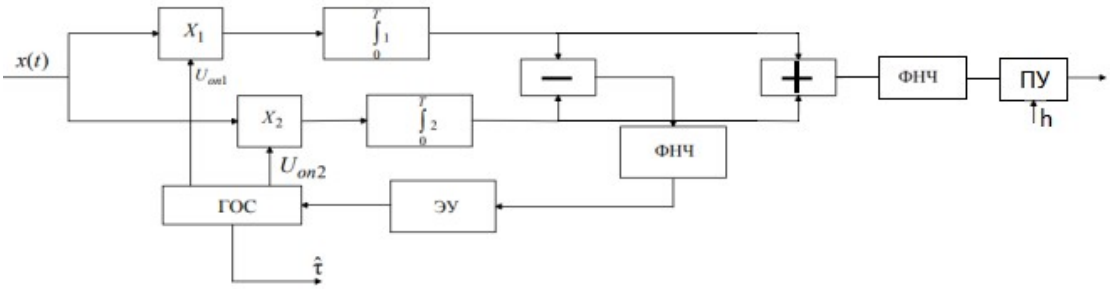


Рисунок 1 – Структура следящего измерителя временного

Структурная схема оптимально оценивает временную задержку (λ=τ). Можно синтезировать и следящую оценку временного положения, если приравнять к нулю производную от натурального логарифма функционала правдоподобия по измеряемому параметру τ .

Временное смещение Δ выбирается равным или длительности элементарного дискрета, или его половине, если сигнал цифровой. Для непрерывного сигнала Δ равно интервалу дискретизации или половине этого

интервала.

Элемент управления (ЭУ) преобразует напряжение рассогласования во временную задержку опорных колебаний. Синтезированные структуры и оценочная характеристика временной задержки составляют основу при проектировании синхронизирующих устройств в системах обработки информационных сигналов.

В третьей главе рассматриваются методы временной синхронизации в широкополосных системах связи .

Метод последовательного пошагового поиска заключается в сдвиге ПСП на один временной шаг и вычислении значения корреляции на каждой позиции. Когда значение корреляции достигает максимума, система определяет положение синхронизации. Данный метод отличается простотой реализации и высокой надёжностью, однако его основным недостатком является низкая скорость поиска, особенно при большой длине ПСП.

Пусть T_{cp} - среднее время поиска, т.е. $T_{cp} = \frac{N}{2} \cdot T_a$, где N - значность последовательности (ПСП), T_a - время анализа.

Пусть P_0 - вероятность правильной оценки временного положения на попытке анализа, тогда вероятность правильной оценки за время поиска будет равна:

$$P_{np} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} P_0^i = \frac{1}{N} \cdot \frac{P_0(1-P_0^N)}{1-P_0} = 1 - \frac{N}{2}(1-P_0)$$

$$T_{cp} = \frac{2N\tau_0}{q} \ln\left[\frac{N}{(1-P_{np})\sqrt{2\pi}}\right]$$

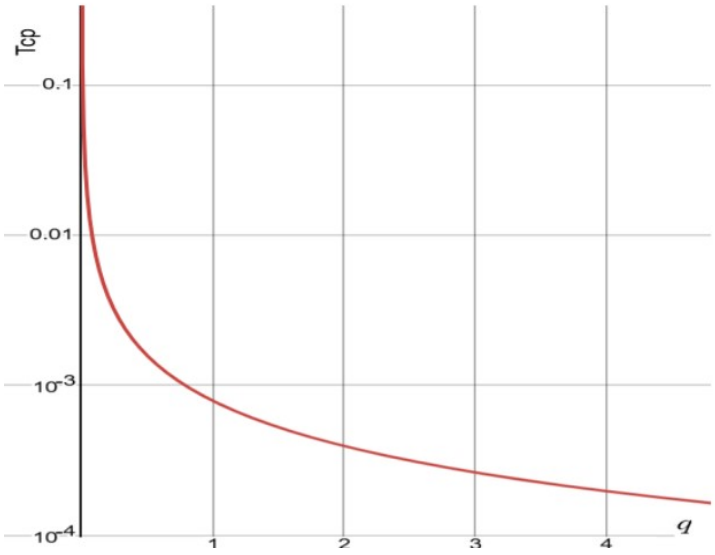


Рисунок 2 – Зависимость среднего времени поиска от отношения сигнал/шум

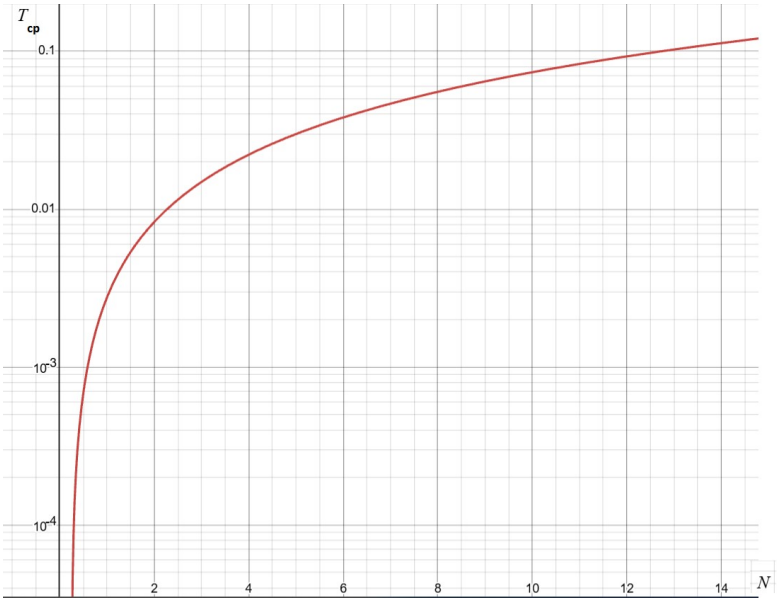


Рисунок 3 – Зависимость среднего времени поиска от отношения длинтельности

Пошаговый поиск по временному положению

$f_{tпер} \cong f_{tпр}$, $P_{ош} = 1 - \Phi(\sqrt{qB})$, где $B = F_{эфф} T_c$

Недостаток:

Фундаментальный недостаток традиционных приёмников с последовательным поиском — необходимость сканировать всю область временной неопределённости. Как следует из математических расчётов, среднее время синхронизации критически зависит от объёма этой области и вероятности обнаружения. В условиях быстрого движения или высокого уровня помех вероятность обнаружения резко уменьшается, что приводит к многократному перезапуску циклов поиска. Результатом становятся задержки, выходящие за пределы допустимого для систем реального времени.

Требование к минимальной погрешности оценки неэнергетических параметров (времени запаздывания, фазы, частоты) является критичным для высокоточных радиосистем. Хотя метод поиска с шагом λ=1/2 повышает вероятность правильного обнаружения, он всё же демонстрирует значительный разброс времени синхронизации . В противоположность ему беспоисковый приёмник исключает случайные флуктуации, даря системе мгновенный отклик и стабильность.

Метод скользящего поиска осуществляет непрерывное сканирование по времени и использует коррелятор для обнаружения пика сигнала при достижении синхронизации. Такой подход позволяет сократить время поиска и подходит для систем с высокими требованиями к скорости, однако требует более сложной обработки сигналов и чувствителен к шумам при обнаружении корреляционного пика.

Пусть $f_{tпер}$ - тактовая частота генератора ПСП на передающей стороне, а $f_{tпр}$ - тактовая частота опорной ПСП на приемной стороне , тогда

$f_{tпер} - f_{tпр} = \Delta f_T \le \Delta f_{зах}$, где $\Delta f_{зах}$ - полоса захвата следящей системы.

По сравнению вероятности ошибки при когерентный прием ПС – сигналов ($P_{ошкп}$) , беспоискового приемника ($P_{ошак}$) пседослучайных сигналов с пошаговом поиском по временному положению ($P_{ошпп}$):

На основании приведенного выше графика, в том же значении отношения сигнал/шум $q_{вх}$, вероятность ошибки беспоискового приемника пседослучайных сигналов $P_{ошпп}$ имеет самая большая вероятность, и самая маленькая – это вероятность ошибки ($P_{ошкп}$) поиска при когерентный прием ПС - сигналов с ДФМн и инверсной информационной модуляцией. Расчеты показывают, что для $P_{ошак} \approx 0{,}001$ автокорреляционный прием проигрывает когерентному приему ПС - сигнала 7 дБ. Таким образом, путем исследования поиски по временную положению широкополосных сигналов, мы можем реализовать преимущества и недостатки каждого метода временного поиска.

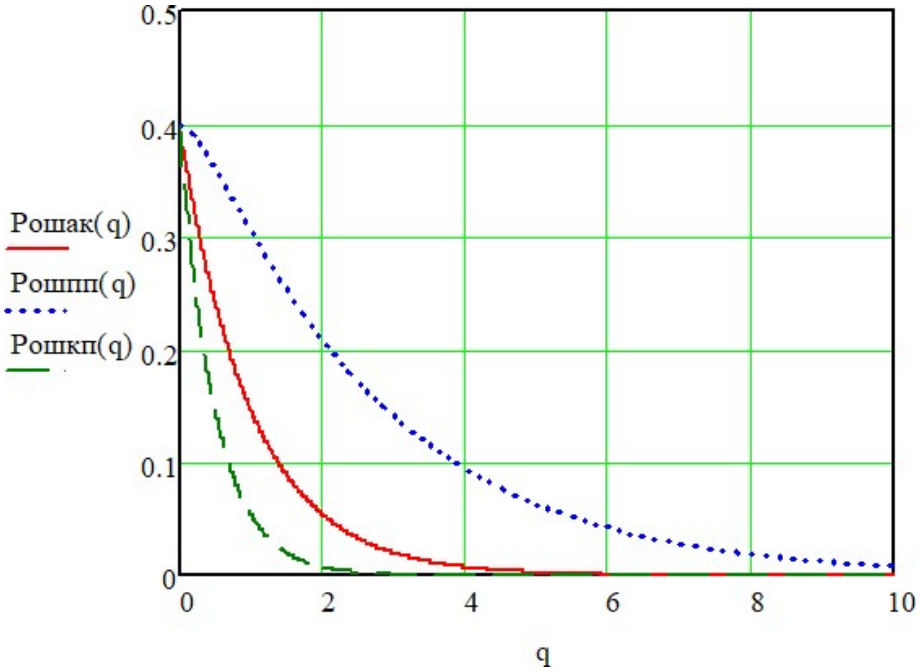


Рисунок 4 - Зависимость вероятности ошибки ($P_{ошак}$, $P_{ошпп}$ и $P_{ошкп}$) оценки временного положения от отношения сигнал/шум ($q_{вх}$, дБ).

Анализ оценки точности слежения за временым положением.

Оценка временного положения радиосигнала. В колебании $x(t) = S(t,\tau) + n(t),\ 0 \le t \le T,$ где $n(t)$ – белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью мощности N_0, а T – время наблюдения, полезный Сигнал $S(t,\tau) = S_0(t\text{-}\tau)cos(\omega_0 t)$ является функцией от временного положения τ.

Величина эквивалентной полосы частот сигнала мало чем отличается от эффективной полосы частот, занимаемой сигналом, поэтому на практике обычно принимают $F_{эк} = F_{эф} = 1000\,Гц$. Белый шум выбирается с спектральной

плотностей мощности. Флюктуационная точность измерения временной

задержки □ . Точность оценки временного положения сигнала тем выше, чем шире полоса частот сигнала и больше отношение сигнал/шум на входе приемника.

Следует дисперсии оценки временного положения: $\sigma_\tau^2 = \frac{1}{\left(\frac{2E}{N_0}\right)} F_{ЭК}^2$

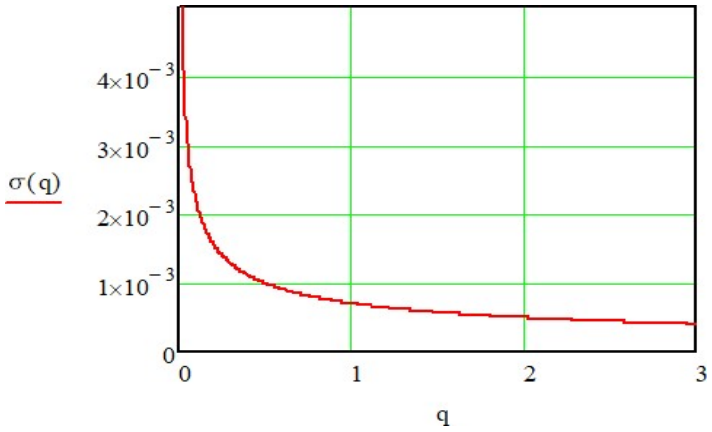


Рисунок 5 - Зависимость дисперсии оценки временного положения от отношения сигнал/шум.

В **чеивертой главе** представлены результаты компьютерного моделировании алгоритмов поиска. Математический синтез устройства с сигналом четверично- кодированной последовательности, синтезировать генератор сигнала $x(t) = S_1(t)+S_2(t)$, с тактовой частотой равной $f_т$. Экспериментальный случай на примере $S_1(t)$ - ЧКП $А_0^3$, $S_2(t)$- ЧКП $А_1^3$ (четверично-кодированная последовательность), $f_т$ = 1 кГц и синтезировать структуру оценки временного положения этого радиосигнала.

Моделирование производится в среде *Simulink*. Генератор искомой последовательности 001 и 000 в среде моделирования *Simulink.*

Временная диаграмма представляет собой график зависимости какого либо параметра сигнала (например, напряжения или тока) от времени. На временной диаграмме сигнала можно наблюдать форму сигнала. Временную диаграмму (осциллограмму) можно визуально наблюдать с помощью специального измерительного прибора – осциллографа.

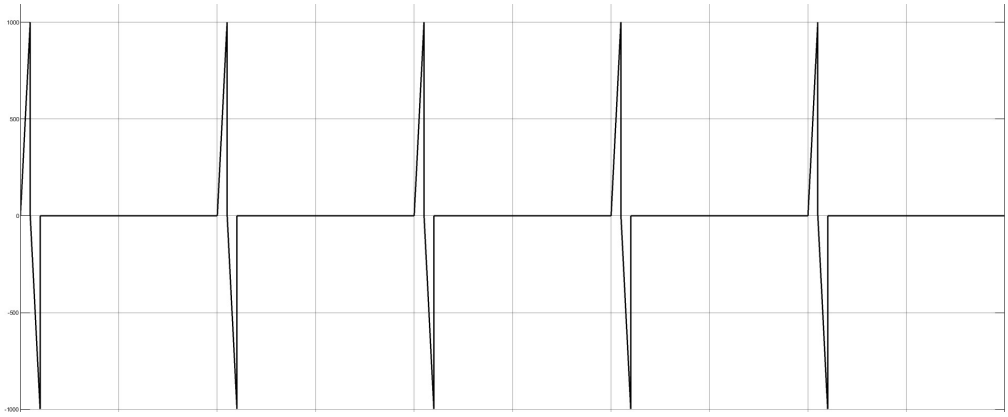


Рисунок 6 – Временная диаграмма оценки временного положения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведен синхронизация в широкополосных системах связи.

Проведены обзор литературных источников по широкополосным системам связи (ШПСС); проблема синхронизации в широкополосных системах; анализ поиска по временную положению широкополосных сигналов; анализ оценки точности слежения за временым положением; компьютерное моделирование алгоритмов поиска в среде *Matlab*.

ШПС получили применение в широкополосных системах связи (ШПСС) позволяют в полной мере реализовать преимущества оптимальных методов обработки сигналов; обеспечивают высокую помехоустойчивость связи; допускают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот и так далее.

Методы поиска ШПС в пространстве параметров синхронизации во многом отличаются от методов радиолокационного поиска цели в зондируемом пространстве, хотя некоторые из них можно использовать и при реализации систем поиска ШПС. В главе 3 показаны преимущества и недостатки каждого метода временного поиска.

Синтезированные структуры и оценочная характеристика временной задержки составляют основу при проектировании синхронизирующих устройств в системах обработки информационных сигналов.

В исследование был смоделирован генератор ЧКП (четверично-кодированной последовательности), на основе генератора тактовых импульсов, *JK*-триггеров и логических элементов. Была сформирована последовательность ЧКП A_0^3, $S_2(t)$- ЧКП A_1^3 для этих импульсов была задана тактовая частота следования f_t =1кГц, были получены оценка временного положения, ее дисперсия и флюктуационная точность измерения временного задержки. Моделирование было сделано с помощью среды моделирования *Simulink.*

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Тезисы конференций

1–А. Ле Нгуен Лонг, Митюхин А.И. Нелинейный код Адамара над квадратичными вычетами в поле Галуа / А.И. Митюхин // Сборник материалов 61-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 22-26 апреля 2025 г.: Электронные системы и технологии / Минск: БГУИР, 2025. – С.57-58.

2–А. Ле Нгуен Лонг. Оценка времени поиска при пошаговом последовательном методе / Ле Нгуен Лонг // Сборник материалов 62-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 15-16 апреля 2026 г.: Радиотехника и электроника / Минск: БГУИР, 2026. – С.82-83.

3–А. Ле Нгуен Лонг. Синтез устройств синхронизации в системах ШПС / Ле Нгуен Лонг // Сборник материалов 62-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 15-16 апреля 2026 г.: Радиотехника и электроника / Минск: БГУИР, 2026. – С.84-85.