

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

РГБ ОД

ЖАГРОВ Дмитрий Александрович

7 - АВГ 2000

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СИГНАЛЬНОЙ
СИНХРОНИЗАЦИИ В ОБЪЕДИНЕННОЙ СИСТЕМЕ
СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

Специальность: 05.12.21 – Радиотехнические системы
специального назначения,
включая технику СВЧ и
технологии их производства.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Нижний Новгород 2000

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете.

Научный руководитель: ЗДРАВОМЫСЛОВА Ольга Александровна,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
НГТУ, г. Н.Новгород.

Официальные оппоненты: КРЫЛОВ Владимир Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
НГТУ, г. Н.Новгород

КОЧЕТКОВ Сергей Леонидович
кандидат технических наук,
ООО «Тэлма», г. Н.Новгород.

Ведущее предприятие: Военный авиационный технический
университет, г.Москва.

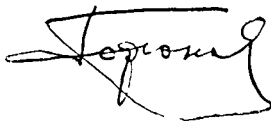
Защита состоится "16" июня 2000 г. в _____ час. на
заседании специализированного Совета Д.063.85.06 в Ниже-
городском государственном техническом университете по адресу:
603600, г. Н.Новгород, ГСП-41, ул.Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ.

Автореферат разослан "5" мая 2000 г.

Ученый секретарь специализированного Совета

к.т.н, доцент



М.В.Горюнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Создание интегрированных систем связи, навигации и идентификации в последние два десятилетия является одной из актуальнейших задач в области разработки современных радиоэлектронных систем для подвижных объектов.

К теоретическим предпосылкам интеграции функций обмена данными и навигации можно отнести известное положение о том, что одним из условий оптимального приема дискретных во времени сигналов является знание задержки прихода сигнала относительно времени его излучения в радиоканал. Поскольку значение задержки зависит от взаимного пространственного расположения абонентов, получение оценки величины сигнальной задержки является необходимым условием для определения расстояния между абонентами, что, в свою очередь, является основой для реализации системы радионавигации. Знание своих координат и возможность обмена данными позволяют построить систему идентификации.

Одним из самых перспективных вариантов построения подобной системы является использование предложенного в конце 70-х годов метода распределенного временного деления (РВР) пропускной способности радиоканала, при котором дискретом деления единого канала между абонентами является интервал события, внутри которого излучается один радиопульс.

Сигнальная синхронизация, заключающаяся в получении оценки задержки прихода сигнала относительно момента его излучения в радиоканал, играет ключевую роль в системе связи с распределенным временным разделением (ССРВР), поскольку является необходимым условием приема информации и выполнения навигационных расчетов. Точность сигнальной синхронизации обуславливает качество работы системы в целом.

В отличие от известных методов сигнальной синхронизации в системах радиосвязи с временным разделением, синхронизация в ССРВР имеет ряд особенностей, связанных с большой скважностью и случайным периодом следования синхроимпульсов, постоянным изменением взаимного пространственного расположения абонентов системы. Учет совокупности этих факторов обуславливает сложный, многоступенчатый характер процедуры сигнальной синхронизации в ССРВР.

Исследование вопросов построения подсистемы синхронизации, синтез и исследование алгоритмов определения сигнальной задержки для различных этапов процедуры синхронизации, определение количественных характеристик

(количества синхроимпульсов, среднего периода следования импульсов), а также вопросы практической реализации разработанных алгоритмов на современной элементной базе являются актуальными.

Актуальность этих исследований возрастает с развитием нового класса радиотехнических систем – интегрированных систем связи, навигации и опознавания.

Цель и задачи исследования. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование алгоритмов сигнальной синхронизации в ССРВР, в том числе:

- синтез алгоритмов экстраполяции и интерполяции сигнальной задержки;
- создание математической имитационной модели процедуры точной сигнальной синхронизации в реальных каналах с РВР;
- исследование на базе этой модели количественных и точностных параметров сигнальной синхронизации;
- разработка практически реализуемых алгоритмов точной сигнальной синхронизации.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался математический аппарат теории вероятностей, линейной фильтрации случайных процессов, а также статистическое моделирование на ЭВМ.

Научная новизна.

В результате выполнения работы:

- разработана математическая модель процедуры точной сигнальной синхронизации в ССРВР, учитывающая характер изменения задержки прихода сигнала между управляемыми подвижными объектами и случайный характер следования импульсов в реальных каналах ССРВР.
- предложен критерий оптимальности затрат системных ресурсов при выборе параметров синтезированного оптимального алгоритма точной сигнальной синхронизации, обеспечивающих заданную точность синхронизации при минимальном количестве синхроимпульсов на этапе входа в синхронизм.
- синтезирован алгоритм оптимальной линейной интерполяции на фиксированном интервале для вектора параметров гауссовской случайной величины.
- предложен ряд квазиоптимальных, практически реализуемых алгоритмов точной сигнальной синхронизации в ССРВР. На базе разработанной имитационной математической модели проведен анализ характеристик предложенных алгоритмов.

Практическая ценность. Методом статистического моделирования на ЭВМ выполнены исследования характеристик

алгоритмов сигнальной синхронизации в ССРВР. Определены параметры точной сигнальной синхронизации, которые могут быть включены в системные протоколы ССРВР.

Предложены квазиоптимальные, практически реализуемые в разрабатываемых технических средствах ССРВР, алгоритмы точной сигнальной синхронизации, обеспечивающие заданное качество синхронизации.

Разработанная математическая модель точной сигнальной синхронизации позволяет на своей основе производить исследование поведения подсистемы точной сигнальной синхронизации при воздействии различных внешних факторов, использовании произвольных алгоритмов синхронизации и сценариев изменения траектории движения объектов.

Полученные при выполнении диссертационной работы результаты использованы при разработке математического обеспечения устройств и систем связи в ГУП НПП «Полет» (г. Н.Новгород) и АООТ КБ «Сухого» (г. Москва), что подтверждается соответствующими Актами об использовании научных положений и выводов диссертационной работы.

Публикации и апробация работы.

По результатам диссертации опубликовано 9 печатных работ, сделаны доклады на:

- межотраслевой научно-технической конференции «Средства связи в авиации», 1989 г., г. Горький;
- всесоюзной научно-технической конференции «Компьютерные методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам», 1990г., г. Москва;
- международной конференции «100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники», 1995г., г. Москва;
- научно-технической конференции факультета информационных систем и технологий Нижегородского технического университета, 1999 г., г. Нижний Новгород.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель процедуры точной сигнальной синхронизации в ССРВР с использованием в качестве априорной модели изменения задержки во времени модифицированной модели Зингера.
2. Синтезированные алгоритмы линейной экстраполяции и интерполяции сигнальной задержки, оптимальные по критерию минимума СКО.

3. Результаты теоретического анализа алгоритма экстраполяции сигнальной задержки по критерию обеспечения заданной точности оценки при минимальном количестве синхроимпульсов.
4. Имитационная модель процедуры точной сигнальной синхронизации для анализа влияния случайного характера следования импульсов.
5. Результаты экспериментального анализа на базе имитационного моделирования алгоритмов экстраполяции и интерполяции задержки в каналах с постоянным и случайным периодом следования импульсов.
6. Синтезированные квазиоптимальные алгоритмы точной сигнальной синхронизации, практически реализуемые в разрабатываемых технических средствах и обеспечивающие заданную точность синхронизации.
7. Результаты экспериментального анализа на базе имитационного моделирования квазиоптимальных алгоритмов точной сигнальной синхронизации.

Структура диссертационной работы: работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертационной работы 211 страниц, включая приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена цель диссертационной работы, показаны ее актуальность и практическая значимость, определена новизна полученных результатов, представлены основные положения выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе содержится краткое описание преимуществ объединенной системы связи и навигации, построенной с использованием метода РВР.

В качестве радиопульса в ССРВР используется М-ичный ($M = 32$) квазиортогональный импульсный сигнал (рис.1.2) в виде посылки длительностью 6,4 мкс с внутримпульсной модуляцией несущей частоты. База такого сигнала равна 32. Длительность элементарного подимпульса в посылке равна 200 нс. В качестве внутримпульсной модуляции используется частотная манипуляция с минимальным сдвигом (ЧММС). Информация закладывается в радиопульс с использованием циклической сдвига опорной М-ичной последовательности, позволяющего передать в одном импульсе ССРВР 5 бит информации в 32-х символьном алфавите.

Приведено краткое описание принципа распределенного временного разделения каналов и принципов построения

подсистемы сигнальной синхронизации в ССРВР. Основной задачей сигнальной синхронизации в ССРВР является получение оценки задержки прихода сигнала с точностью, обеспечивающей заданное качество приема информации и навигационных измерений.

Выполнен обзор литературы по сигнальной синхронизации, выявлен ряд вопросов, требующих дополнительной проработки или решения, сформулирована задача диссертационной работы.

Во второй главе диссертации исследуется алгоритм точной сигнальной синхронизации в ССРВР. Показано, что СКО экстраполированной на момент приема информационного импульса сигнальной задержки не должно превышать 33 нс для обеспечения безошибочного приема данных. В качестве априорной модели изменения задержки прихода сигнала во времени предложено использовать модифицированную модель Зингера:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \vartheta \\ \frac{d\vartheta}{dt} = -\alpha\vartheta + a \\ \frac{da}{dt} = -\beta a + n_a(t) \end{cases} \quad (1)$$

где τ, ϑ, a – задержка, скорость и ускорение изменения задержки во времени, соответственно; α и β – коэффициенты, характеризующие изменения скорости и ускорения задержки во времени; $n_a(t)$ – формирующий белый гауссовский шум.

С помощью приведенной методики осуществлен переход к априорной модели изменения задержки в дискретном времени:

$$\underline{\lambda}_v = \underline{A}_{v-1} \underline{\lambda}_{v-1} + \underline{n}_{\lambda v} \quad (2)$$

где: $\underline{\lambda}_v = \begin{bmatrix} \tau_v \\ \vartheta_v \\ a_v \end{bmatrix}$ – вектор параметров задержки в момент времени t_v .

$$\underline{A}_{v-1} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta & \frac{\Delta^2}{2} \\ 0 & 1 - \alpha\Delta & \Delta \\ 0 & 0 & 1 - \beta\Delta \end{bmatrix} \quad \text{- матрица линейных коэффициентов}$$

$\Delta = t_v - t_{v-1}$ – интервал между двумя дискретными моментами времени

$$\underline{n}_{\Delta v} = \begin{bmatrix} n_v^r \\ n_v^g \\ n_v^o \end{bmatrix} - \text{вектор формирующих шумов, представляющих}$$

собой БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционной матрицей $\underline{\Psi}_v$.

Уравнение наблюдения записывается следующим образом:

$$\underline{\xi}_v = \underline{H}_v \underline{z}_v + \underline{n}_{0v} \quad (3)$$

где $\underline{\xi}_v = [r_{v,uv}]$ - вектор измерений

$\underline{H}_v = [1 \ 0 \ 0]$ - вектор-строка коэффициентов

$\underline{n}_{0v} = [n_v]$ - дискретный векторный БГШ с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей

$$\underline{V}_v = M\{\underline{n}_{0v} \cdot \underline{n}_{0v}^T\} = [\sigma_{n,uv}^2]$$

Произведен синтез оптимального алгоритма точной сигнальной синхронизации с использованием теории линейной фильтрации:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{z}}_v &= \underline{A}_{v-1} \hat{\underline{z}}_{v-1} + \underline{K}_v (\underline{\xi}_v - \underline{H}_v \underline{A}_{v-1} \hat{\underline{z}}_{v-1}) \\ \underline{R}_v &= (\underline{I} - \underline{K}_v \underline{H}_v) \tilde{\underline{R}}_v \\ \tilde{\underline{R}}_v &= \underline{A}_{v-1} \underline{R}_{v-1} \underline{A}_{v-1}^T + \underline{\Psi}_v \\ \underline{K}_v &= \tilde{\underline{R}}_v \underline{H}_v^T (\underline{H}_v \tilde{\underline{R}}_v \underline{H}_v^T + \underline{V}_v)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

Оценка вектора параметров задержки в момент времени t_m внутри интервала времени между обработкой двух измерений ($t_{v-1} < t_m < t_v$) определяется, с учетом $\underline{H}_m = 0$, выражением: $\hat{\underline{z}}_m = \underline{A}_{v-1} \hat{\underline{z}}_{v-1}$, а точность такой экстраполируемой оценки определяется выражением

$$\underline{R}_m = \underline{A}_{v-1} \underline{R}_{v-1} \underline{A}_{v-1}^T + \underline{\Psi}_m.$$

Получена зависимость величины ошибки экстраполяции от величины постоянного периода следования синхроимпульсов в установившемся режиме работы фильтра точной сигнальной синхронизации (рис.1) при следующих параметрах: длительность постоянного периода следования синхроимпульсов $\Delta = 6.5$ мс, $\sigma_{изм} = 40$ нс (отношение сигнал/шум $\frac{2E}{N} = 10$), $\alpha = 0.05 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 0.1 \text{ с}^{-1}$, $\tau_s = 200$ нс.

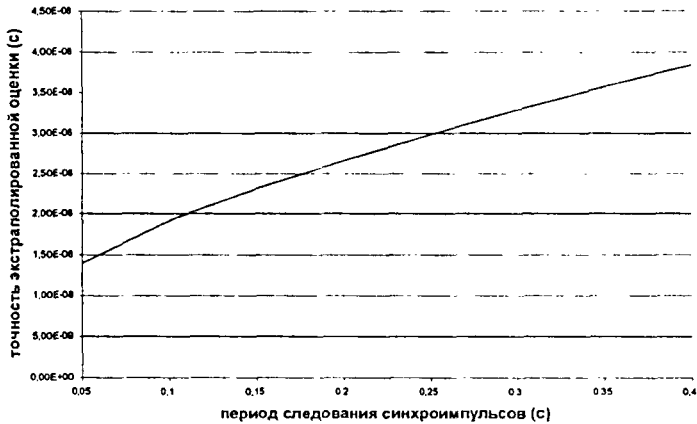


Рис. 1

Разработана математическая модель процедуры точной сигнальной синхронизации, позволяющая методом имитационного моделирования получить оценки характеристик алгоритмов сигнальной синхронизации при их реализации в реальных каналах ССРВР.

С помощью имитационного моделирования получены оптимальные по критерию минимального общего числа синхроимпульсов, обрабатываемых на этапе входа в синхронизм, параметры процедуры точной сигнальной синхронизации в виде зависимости относительных периодов следования синхроимпульсов и количества синхроимпульсов на различных этапах процедуры входа в синхронизм от среднего периода следования импульсов в канале.

В третьей главе исследуется алгоритм интерполяции сигнальной задержки в ССРВР. Получены выражения для алгоритма оптимальной линейной интерполяции сигнальной задержки на фиксированном интервале:

$$\begin{cases}
 \hat{\lambda}_v^u = \underline{A}_{v+1}^{-1} m_{\sigma v+1} + R_v^u R_v^{-1} (\hat{\lambda}_v - \underline{A}_{v+1}^{-1} m_{\sigma v+1}) \\
 \underline{R}_v^{-1} = R_v^{-1} + R_{\beta v}^{-1} \\
 R_{\beta v} = \underline{A}_{v+1}^{-1} (\Psi_{v+1} + R_{\sigma v+1}) \underline{A}_{v+1}^{-T} \\
 m_{\sigma v+1} = R_{\sigma v+1} (R_{v+1}^{-1} \hat{\lambda}_{v+1}^u - \underline{R}_{v+1}^{-1} \underline{A}_v \hat{\lambda}_v) \\
 R_{\sigma v+1}^{-1} = R_{v+1}^{-1} - \underline{R}_{v+1}^{-1}
 \end{cases} \quad (7)$$

Блок-схема устройства вычисления оптимальной интерполированной оценки параметров задержки представлена на

рис. 2. Она включает в себя три основных блока: оптимальный фильтр (ОФ), блок памяти (БП) и оптимальный интерполятор (ОИ).

Процесс определения интерполированной оценки выполняется в два этапа. На первом этапе по мере прихода синхриимпульсов в блоке оптимального фильтра вычисляется оценка параметров задержки с помощью выражений для оптимальной линейной фильтрации (4). После обработки каждого импульса в блоке памяти сохраняются следующие матричные и векторные величины: $\hat{\lambda}_v$, \underline{A}_v , \underline{R}_v , $\tilde{\underline{R}}_v$, $\underline{\Psi}_v$. Начиная с $j+1$ -го импульса начинается обработка импульсов в блоке оптимального интерполятора в обратном временном порядке согласно выражениям (7), при этом в качестве начальных величин для первого обрабатываемого импульса в указанных выражениях используются $\hat{\lambda}_{j+1}^* = \hat{\lambda}_{j+1}$ и $\underline{R}_{j+1}^* = \underline{R}_{j+1}$.

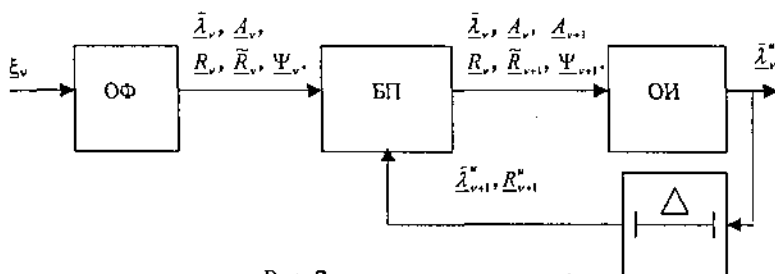


Рис. 2.

Приведены результаты имитационного моделирования, показавшего, что при использовании синтезированного алгоритма в системах с постоянным периодом следования импульсов возможно определить длительность интервала выполнения алгоритма интерполяции, обеспечивающую получение минимальной ошибки интерполированной оценки задержки в конце данного интервала. В частности для постоянного периода следования синхриимпульсов в канале в установившемся режиме $\Delta = 100$ мс, $\sigma_{\text{шум}} = 40$ нс (отношение сигнал/шум $\frac{2E}{N} = 10$), $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.1$, $\tau_s = 200$ нс, величина интервала равна 7-8 импульсам.

Приведены результаты имитационного моделирования, показавшего, что при использовании синтезированного алгоритма в системах со случайным периодом следования импульсов в канале не удается определить длину интервала, в конце которого могут быть гарантировано получены более точные интерполированные оценки задержки по сравнению с оценками параметров задержки,

полученными в процессе работы фильтра точной сигнальной синхронизации.

В четвертой главе исследуется ряд практически реализуемых квазиоптимальных алгоритмов точной сигнальной синхронизации. В качестве подобных алгоритмов предложены алгоритм точной сигнальной синхронизации с фиксированными значениями параметров α и β , и СКО измеренной задержки; алгоритм с табулированной для заданного среднего периода следования импульсов в канале корреляционной матрицей ошибок; алгоритм с упрощенной априорной моделью изменения задержки, не включающей ускорение изменения задержки ($\beta = 0$).

Проведено исследование характеристик предложенных алгоритмов методом машинного моделирования с использованием описанной ранее математической модели. В результате моделирования получены оценки степени ухудшения точности сигнальной синхронизации при использовании упрощенных алгоритмов. Приведены оценки затрат вычислительной мощности бортовых ЭВМ для предложенных алгоритмов.

В частности, алгоритм с табулированной корреляционной матрицей практически не уступает в точности синхронизации оптимальному алгоритму в установившемся режиме работы и позволяет получить выигрыш в 5.7 раза в затратах процессорного времени. Алгоритм с упрощенной априорной моделью изменения задержки в режиме входа в синхронизм ухудшает точность синхронизации на 7-8 % по сравнению с оптимальным алгоритмом, но позволяет получить выигрыш в 2.4 раза в затратах процессорного времени.

В заключении к диссертации перечислены основные результаты, полученные в процессе ее выполнения.

В приложениях представлены тексты программной реализации имитационной модели процедуры сигнальной синхронизации в ССРВР, а также тексты программ, разработанных для получения точностных характеристик различных алгоритмов сигнальной синхронизации при работе в реальных каналах ССРВР.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

Перечислим основные результаты, полученные в процессе выполнения диссертации.

1. Разработана математическая модель процедуры точной сигнальной синхронизации в ССРВР с использованием в качестве априорной модели изменения задержки во времени модифицированной модели Зингера;

2. Синтезирован алгоритм линейной экстраполяции сигнальной задержки по критерию минимума СКО;
3. На основе теоретического анализа алгоритма экстраполяции показано, что использование двухступенчатого изменения периода следования импульсов на этапе входа в синхронизм позволяет как минимум на 25% уменьшить общее число требуемых импульсов. В отдельных случаях выигрыш достигает 3 и более раз.
4. Разработана имитационная модель для статистического моделирования процедуры точной сигнальной синхронизации в реальных каналах ССРВР.
5. На основе имитационного моделирования получены значения параметров алгоритма точной сигнальной синхронизации (средний период следования синхроимпульсов, количество синхроимпульсов), совпадающие с результатами, полученными теоретическим путем.
6. Показано, что в целом случайный период следования импульсов в реальных каналах ССРВР не оказывает существенного влияния на точностные характеристики экстраполяции сигнальной задержки, полученные аналитическим путем в предположении постоянного периода следования импульсов в канале.
7. Синтезирован алгоритм линейной интерполяции задержки, оптимальный по критерию минимума СКО;
8. Проведено имитационное моделирование работы алгоритма интерполяции сигнальной задержки, показавшее, что в системах с постоянным периодом следования импульсов существует конечный интервал выполнения алгоритма интерполяции, обеспечивающий получение минимальной ошибки интерполированной оценки задержки на момент окончания данного интервала.
9. Показано, что при использовании алгоритма интерполяции задержки в системах со случайным периодом следования импульсов в канале не удастся определить длину интервала получения минимальной ошибки интерполяции и, следовательно, использование синтезированного алгоритма представляется нецелесообразным.
10. Предложены следующие квазиоптимальные алгоритмы точной сигнальной синхронизации:
 - с фиксированными значениями параметров α и β , и отношением сигнал шум при приеме синхроимпульсов;
 - с табулированной для заданного среднего периода следования импульсов в канале корреляционной матрицей ошибок;

- с упрощенной априорной моделью изменения задержки, не включающей ускорение изменения задержки ($\beta = 0$).
- 11. На основе имитационного моделирования показано, что предложенные алгоритмы при определенных условиях обеспечивают заданную точность синхронизации.
- 12. Предложенные квазиоптимальные алгоритмы требуют меньших затрат вычислительных ресурсов по сравнению с оптимальными и могут быть рекомендованы для практической реализации на современной элементной базе.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Исследование алгоритмов точной синхронизации в объединенной системе связи и навигации. Тезисы докладов Межотраслевой научно-технической конференции Средства связи в авиации. Горький. 1989 г, с.74.
2. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Синтез алгоритмов точной синхронизации в объединенной системе связи и навигации. Техника средств связи. Серия "Техника радиосвязи". Выпуск 2. Москва. 1990 г, с.35-42.
3. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Исследование алгоритмов точной синхронизации с уменьшенным временем вычислений для объединенной системы связи и навигации. Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции "Компьютерный методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам". Москва. "Радио и связь". 1990 г, с.63.
4. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Принципы построения подсистемы синхронизации в объединенной системе связи и навигации. Техника средств связи. Серия "Техника радиосвязи". Выпуск 2. Нижний Новгород. 1991 г. с.39-46.
5. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Исследование алгоритмов точной сигнальной синхронизации с табулированной корреляционной матрицей ошибок в объединенной системе связи и навигации. Техника средств связи. Серия "Техника радиосвязи". Выпуск 2. Нижний Новгород. 1992 г. с.45-49.
6. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Исследование вероятностных характеристик упрощенного порогового алгоритма грубой синхронизации в объединенной системе связи и навигации. Научно-методические материалы по статистической радиотехнике. -М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского 1995 г.

7. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Исследование алгоритмов сигнальной синхронизации в объединенной системе связи и навигации. Тезисы докладов Международной конференции "100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники". Москва, 1995г.
8. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Исследование алгоритма интерполяции сигнальной задержки в объединенной системе связи и навигации. Тезисы докладов научно-технической конференции факультета информационных систем и технологий Нижегородского государственного технического университета, посвященной 80-летию Нижегородской радиолaborатории. Нижний Новгород, 1998 г., с.75.
9. Жагров Д.А., Здравомыслова О.А. Синтез алгоритма интерполяции сигнальной задержки в объединенной системе связи и навигации. Системы обработки информации и управления. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 4. Н.Новгород, 1998г,с.149-157.