

На правах рукописи



Круглик Евгений Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕМОДУЛЯТОРА
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОТОКА, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ
МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ**

**Специальность 05.12.04. – «Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения»**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2006

Работа выполнена на кафедре «Системы, устройства и методы геокосмической физики»
Московского Физико-Технического Института (ГУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Алексей Александрович Романов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Валерий Иванович Бобылев
кандидат технических наук
Кирилл Юрьевич Березин

Ведущая организация:

НИИ точных приборов

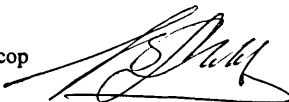
Защита диссертации состоится 22 сентября 2006 г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д 850.012.01 при Государственном унитарном предприятии
«Научно-производственный центр «СПУРТ» по адресу: 124460, Москва, Зеленоград, 1-й
Западный проезд, д. 4, ГУП НПЦ «СПУРТ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУП НПЦ «СПУРТ».

Автореферат разослан 11 сентября 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Лаврищев В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Изучение дальнего космоса является актуальной задачей в современном мире. Активно изучаются Марс, Венера, Сатурн, планируются проекты по освоению Луны. Для данных задач требуется передача больших объемов информации, следовательно, возрастают требования к скорости передачи данных. В данном направлении активно работают американские ученые. В настоящий момент идет разработка космического аппарата для исследования Луны Лунный орбитальный разведчик (Lunar Reconnaissance Orbiter). На данном аппарате планируется реализовать высокоскоростную радиолинию со скоростью передачи данных 100 – 300 Мбит/с, работающую в Ка-диапазоне. Запуск аппарата планируется осуществить в четвертом квартале 2008 года.

Скорость передачи информации в дальней космической связи ограничена энергетикой радиолинии. Данную проблему можно решить следующими методами. Улучшить энергетику радиолинии можно путем увеличения мощности передатчика или построения пунктов приема информации с антеннами большого диаметра, порядка нескольких десятков метров. Метод имеет ряд недостатков. Увеличение мощности передатчика ведет к увеличению энергопотребления, понижению надежности, увеличению затрат при проектировании космического аппарата. Построение наземных пунктов приема с большими приемными антеннами требует существенных капиталовложений. От этих недостатков свободен второй метод. Улучшить энергетику радиолинии можно путем применения современных схем помехоустойчивого кодирования, что позволяет работать при малых отношениях сигнал/шум, порядка 0 – 3 дБ. Для реализации данного подхода требуется создание соответствующего наземного

демодулятора. При этом на стороне спутника требуется только наличие помехоустойчивого кодера потока данных, реализация которого при использовании современной элементной базы не представляет трудностей. У данного метода есть недостаток. При малом отношении сигнал/шум восстановление синхронизации потока данных является сложной научно-технической задачей. При наличии ошибок синхронизации безошибочный прием данных не возможен.

Предлагаемая диссертационная работа посвящена решению задачи восстановления синхронизации потока данных при малых значениях отношения сигнал/шум. При этом синхронизация восстанавливается без наличия последовательностей, известных приемнику (преамбул).

Цель работы.

Целью работы является создание высокоскоростного и энергетически высокоэффективного демодулятора принимающего поток данных до 100 Мбит/с при отношении энергии бита к спектральной плотности шума E_b/N_0 порядка 2 – 3 дБ

Задачи, решаемые в работе:

1. Исследование характеристик алгоритмов восстановления тактовой, частотной и фазовой синхронизации при малых значениях отношения сигнал/шум, определение взаимного влияния алгоритмов.
2. Создание методики синхронизации для приема высокоскоростных потоков данных при малых значениях отношения сигнал/шум.
3. Разработка математической модели, описывающей процессы в синхронизаторе с учетом взаимного влияния алгоритмов, производящей оценку влияния параметров синхронизации на вероятность битовой ошибки.

4. Реализация полученных алгоритмов.
5. Разработка методики экспериментальной проверки и определения характеристик демодулятора.

Научная новизна:

1. Предложена и обоснована методика восстановления синхронизации высокоскоростного потока данных, порядка 100 Мбит/с, при отношении энергии бита к спектральной плотности шума порядка 2 дБ;
2. Разработана математическая модель радиоэлектронного тракта применительно к задачам моделирования процессов, протекающих в схемах синхронизации.

Практическая ценность работы.

Практическая ценность работы обусловлена тем, что применение предложенного демодулятора позволит более эффективно использовать космические аппараты дальнего и ближнего космоса посредством передачи большего объема информации, при этом не требуется создание дорогостоящих наземных пунктов приема информации. Передача больших объемов информации достигается за счет увеличения скорости передачи данных. Увеличение скорости передачи данных возможно благодаря применению предлагаемого энергетически эффективного демодулятора. Например, демодулятор позволяет обеспечить прием данных со скоростью 100 Мбит/с модуляция ФМ-4 (QPSK) с вероятностью битовой ошибки не более 10^{-6} от спутника исследования Луны на наземную антенну диаметром 7 метров в X-диапазоне (8050 – 8450 МГц) при передающей спутниковой антенне диаметром 1 метр и мощности передатчика 10 Вт.

Экспериментальная проверка тестового образца демодулятора проведена при помощи технологического образца передатчика космического аппарата «Бауманец», созданного при непосредственном участии автора.

Следовательно, полученные в данной диссертационной работе результаты могут быть положены в основу разработки демодуляторов для высокоскоростного приема данных от спутников как дальнего, так и ближнего космоса.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XLVII на ежегодной научной конференции в Московском физико-техническом институте, на XVII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов в РКК «Энергия» им. С.П. Королева, на 7-м международном форуме «Высокие технологии XXI века», на XXXIII международной конференции IV международной конференции молодых ученых и специалистов «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + S&E06» (Украина 2006), на научно-технической конференции ФГУП «РНИИ КП», посвященной 60-летию предприятия. По теме диссертационной работы имеется 7 публикаций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель радиоэлектронного тракта применительно к задачам моделирования процессов, протекающих в синхронизаторе.
2. Метод восстановления тактовой синхронизации высокоскоростного потока при малом значении отношения сигнал/шум (МОСШ).
3. Метод восстановления частотной синхронизации высокоскоростного потока при МОСШ.

4. Метод восстановления фазовой синхронизации высокоскоростного потока при МОСШ.
5. Результаты экспериментальной проверки приема данных.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 96 страниц машинописного текста и 38 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные цели и задачи диссертации, представлена актуальность данных исследований и научная новизна, перечислены защищаемые положения и кратко изложено содержание всех глав.

Первая глава

В первой главе приведен обзор литературы. В обзоре литературы рассматриваются проблематика приема данных при малых отношениях сигнал/шум в канале с гауссовым шумом. Рассмотрены различные аспекты проектирования демодуляторов.

Показано, что применение турбо кодов позволяет принимать данные при отношении энергии бита к спектральной плотности шума E_b/N_0 0 – 1.5 дБ.

Определена структура демодулятора. Аналоговая часть демодулятора выполняет низкочастотную фильтрацию, оцифровку данных. Цифровая часть выполняет согласованную фильтрацию, восстановление синхронизации потока данных, детектирование и декодирование последовательности

данных. Восстановление синхронизации потока данных происходит следующим образом. Сначала восстанавливается тактовая синхронизация. Это сделано для упрощения реализации синхронизатора, т.к. при восстановленной тактовой синхронизации требуется одна выборка на символ. Далее восстанавливаются частотная и фазовая синхронизации соответственно. В зависимости от требований, предъявляемых к демодулятору, цифровая часть может быть реализована как аппаратным, так и программным способом.

Рассмотрены алгоритмы восстановления синхронизации. Основное внимание уделено алгоритмам, применяемым для непрерывной передачи данных без использования последовательностей известных приемнику (преамбул). В работе рассматриваются алгоритмы восстановления тактовой, частотной и фазовой синхронизации.

Выбраны алгоритмы восстановления синхронизации. Для восстановления тактовой синхронизации претендуют два алгоритма: алгоритм Гарднера и алгоритм «Ранний - Поздний». Алгоритмы имеют схожие характеристики, но анализ литературы не позволяет определить оптимальный алгоритм для работы при малых отношениях сигнал/шум. Для выбора оптимального алгоритма требуется дальнейшее более детальное исследование. Для восстановления частотной синхронизации выбран алгоритм Райфа – Бурстина, для восстановления фазовой – алгоритм Витерби – Витерби.

Проведенный обзор литературы позволил определить основные направления исследований при проведении математического моделирования:

1. оценка и сравнение характеристик алгоритмов восстановления тактовой синхронизации Гарднера (Gardner) и «Ранний - Поздний» (Early – Late algorithm), выбор оптимального из них. Оценка влияния некомпенсированного частотного и фазового сдвига, оценка параметров схемы восстановления тактовой синхронизации, моделирование

- передачи данных при восстановленной тактовой синхронизации с целью оценки потерь на реализацию алгоритма тактовой синхронизации.
2. оценка характеристик алгоритма восстановления частотной синхронизации Райфа – Бурстина (Rife - Boorstyn) при восстановленной тактовой синхронизации. Оценка влияния фазового сдвига. Оценка параметров схемы частотной синхронизации.
 3. оценка характеристик алгоритма восстановления фазовой синхронизации Витерби – Витерби (Viterbi - Viterbi) при восстановленных тактовой и частотной синхронизации. Оценка параметров схемы фазовой синхронизации.
 4. выбор параметров турбо декодера
 5. оценка характеристик демодулятора при восстановленной синхронизации, оценка потерь на реализацию, оценка параметров схем.

Вторая глава

Во второй главе приводятся результаты проведенного математического моделирования демодулятора. Целью моделирования является определение параметров и характеристик демодулятора при заданных параметрах канала.

Выбираются параметры турбо кода. Параметрами турбо кода являются скорость кода, длина блока кода и количество итераций турбо декодирования. Выбор параметров производился для турбо кодов рекомендованных CCSDS (The Consultative Committee for Space Data Systems). Результаты моделирования показали, что турбо код со скоростью $1/2$, длиной блока 8920 имеет оптимальные характеристики для реализации с точки зрения пропускной способности и выигрыша кодирования данных. Вероятность битовой ошибки 10^{-6} для данных параметров достигается при отношении $E_b/N_0 = 1,1$ дБ.

Представлено краткое теоретическое описание процесса восстановления синхронизации.

Приводятся результаты моделирования алгоритмов восстановления синхронизации. В первой главе было показано, что на восстановление тактовой синхронизации могут претендовать два алгоритма: алгоритм Гарднера и алгоритм «Ранний – Поздний» (РП). Результаты моделирования показали, что у алгоритмов практически одинаковые время сходимости и сложность аппаратной реализации, но алгоритм Гарднера имеет лучшую кривую среднеквадратичной ошибки СКО (рис. 1) при малых отношениях сигнал/шум. На рисунке 2 показаны характеристики алгоритма Гарднера при некомпенсированном частотном сдвиге. В реальных системах для дальнего космоса частотный сдвиг составляет единицы процентов от символьной скорости, и, как видно из рисунка 2, характеристика ухудшается незначительно. На рисунке 3 изображен сигнал ошибки, иллюстрирующий процесс сходимости при отношении $E_b/N_0 = 1.8$ дБ.

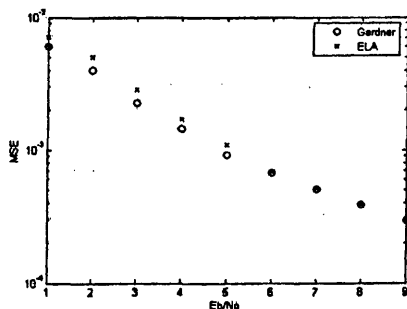


Рис.1. СКО алгоритма Гарднера и алгоритма «Ранний - Поздний»

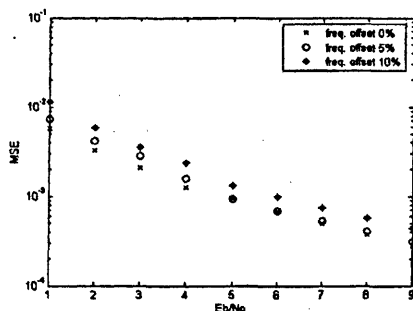


Рис. 2. СКО алгоритма Гарднера при некомпенсированном частотном сдвиге.

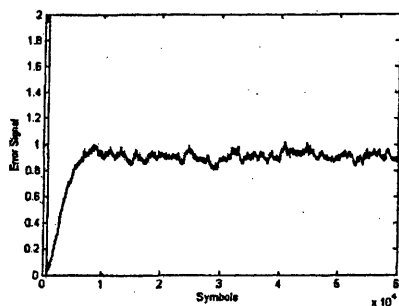


Рис. 3. Сигнал ошибки

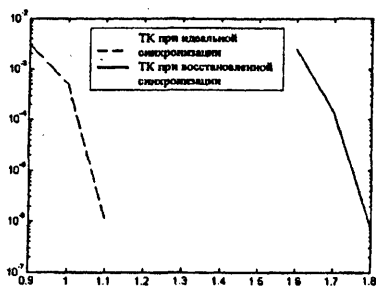


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0

По результатам моделирования определено, что сходимость алгоритма Гарднера составляет порядка $5 \cdot 10^3$ символов. При скорости передачи 50 Мсимв/с (100 Мбит/с, модуляция ФМ-4 (QPSK)) время сходимости составляет 100 мкс. На рисунке 4 изображены характеристики турбо кода при идеальной тактовой синхронизации и синхронизацией, восстановленной по алгоритму Гарднера. Из рисунка видно, что потери на реализацию схемы восстановления тактовой синхронизации составляют приблизительно 0.7 дБ.

Характеристики алгоритма восстановления частотной синхронизации Райфа – Бурстина (РБ) так же оцениваются по критерию среднеквадратичной ошибки. Основным параметром, определяющим характеристики алгоритма РБ, является размер блока быстрого преобразования Фурье (БПФ). На рисунке 5 приведены результаты моделирования алгоритма с разными размерами блока БПФ. Моделирование алгоритма РБ проводилось при восстановленной тактовой синхронизации по алгоритму Гарднера (большинство авторов проводят моделирование, подразумевая идеальную тактовую синхронизацию). При выборе размера блока БПФ 8192, остаточный частотный сдвиг составляет порядка 10^{-5} от символьной частоты.

Характеристики алгоритма восстановления фазовой синхронизации Витерби – Витерби (ВВ) зависят от размера блока усредняемой

последовательности (рис. 6). При выборе размера блока усредняемой последовательности фазовой синхронизации равным 500 символов, при остаточном частотном сдвиге порядка 10^{-5} от символьной частоты, дисперсия ошибки фазы составляет порядка $3 \cdot 10^{-3}$ рад², что на выходе схемы восстановления фазовой синхронизации дает дисперсию ошибки фазы не более 3° . При данном значении дисперсии ошибки фазы, характеристики турбо кода ухудшаются незначительно, порядка 0.1 дБ.

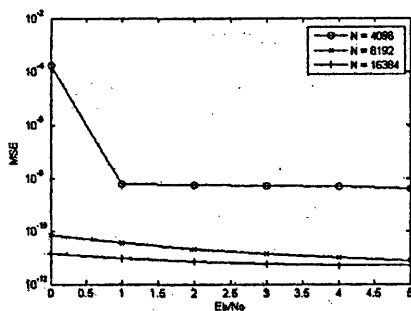


Рис. 5. СКО алгоритма РБ для разных длин блока БПФ

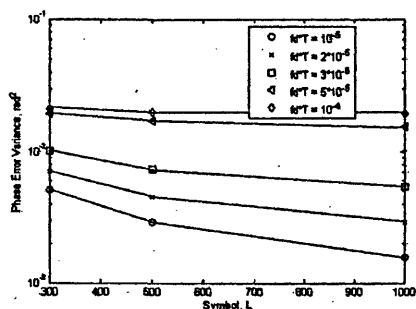


Рис. 6. СКО алгоритма ВВ для разных размеров блока при наличии остаточного частотного сдвига

На рисунке 7 представлены результаты моделирования приемопередающей системы. Приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума. Моделирование проводилось в среде MATLAB со следующими параметрами канала.

Параметры передатчика:

- модуляция ФМ-4;
- фильтрация корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом скругления 0,35;

Параметры турбо кода:

- скорость кода 1/2;
- длина блока кода 8920;

- 6 итераций декодирования.

Параметры синхронизатора:

- корректирование цифровой последовательности в схеме тактовой синхронизации осуществляется линейным интерполятором;
- размер блока БПФ для схемы восстановления частотной синхронизации 8192;
- размер блока для схемы восстановления фазовой синхронизации 500 символов.

Для сравнения приведена характеристика при передаче данных без кодирования и со сверточным кодированием. В случае применения сверточного кодирования декодирование проводилось по алгоритму Витерби с использованием мягких решений, скорость кода $1/2$, подразумевалась идеальная синхронизация. Из рисунка видно, что выигрыш кодирования при применении турбо кода по отношению к сверточному кодированию составляет порядка 2,5 дБ.

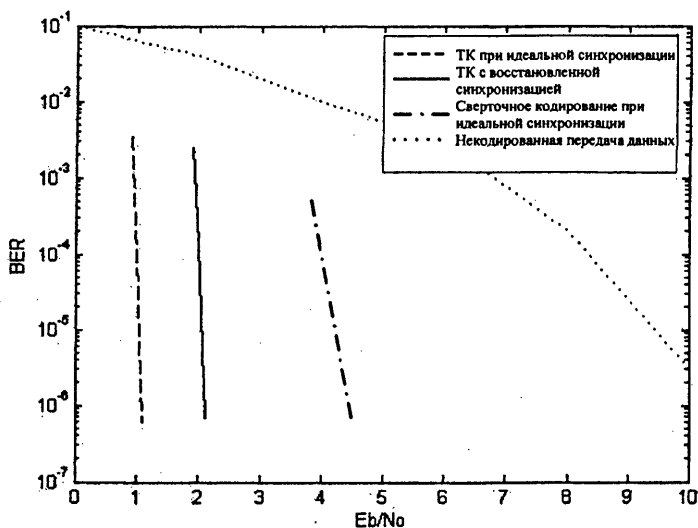


Рис. 7. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0 .

Результаты моделирования определили параметры синхронизатора и демодулятора:

- для восстановления тактовой синхронизации без использования преамбул выбран алгоритм Гарднера. Сходимость алгоритма составляет порядка 5000 символов;
- для восстановления частотной синхронизации по алгоритму Райфа – Бурстина при отношении $E_b/N_0 < 2$ дБ требуется размер блока БПФ не менее 8192;
- для восстановления фазовой синхронизации по алгоритму Витерби – Витерби выбран размер блока наблюдаемой последовательности равный 500 символов;
- при скорости турбо кода $1/2$ и длине блока 8920 символов вероятность битовой ошибки 10^{-6} достигается при отношении $E_b/N_0 = 2$ дБ;
- потери на реализацию составили 0.9 дБ.

Глава третья

В третьей главе изложены подходы к реализации и тестированию демодулятора. При приеме целевой информации от спутников дальнего космоса или спутников дистанционного зондирования Земли демодуляторам не предъявляется требование к отображению информации в реальном времени. Ввиду этого, демодулятор выполнен аппаратно-программным способом. Аппаратная часть выполняет низкочастотную фильтрацию, оцифровку данных, запись оцифрованной последовательности на жесткий диск. Программная часть восстанавливает синхронизацию, выполняет детектирование и декодирование данных. Программная реализация синхронизатора и декодера позволяет улучшить характеристики демодулятора, поскольку все вычисления выполняются над операндами с плавающей точкой, и, кроме того, повысить гибкость, т.к. можно легко

изменять параметры схем. В дальнейшем, при необходимости приема данных в реальном масштабе времени, планируется реализовать демодулятор на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Для тестирования демодулятора был создан стенд. Стенд состоит из передающего устройства, генератора шума, сумматора, анализатора спектра и собственно демодулятора. В качестве передающего устройства использовался технологический образец передатчика для космического аппарата «Бауманец» со следующими характеристиками:

- частотный диапазон X (8050 – 8450 МГц);
- модуляция ФМ-4 (QPSK), коэффициент скругления 0.35 (roll-off factor);
- скорость передачи данных 1- 60 Мсимв/с;
- мощность выходного сигнала –40 .. 36 дБм (10^{-4} .. 4 Вт);
- помехоустойчивое кодирование: турбо кодирование, либо сверточное кодирование при внешнем кодировании Рида – Соломона.

В качестве основного результата на рисунке приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума. Для оценки потерь при реализации демодулятора приведена характеристика турбо кода при идеальной синхронизации и результат моделирования. Потери на реализацию составили порядка 1.1 дБ.

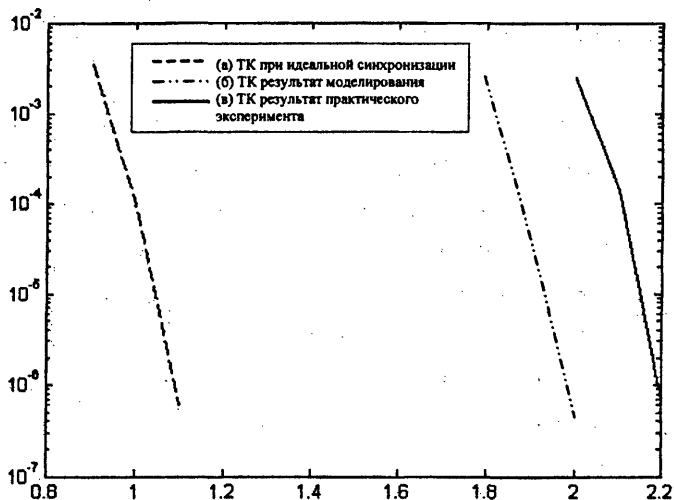


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0 :

а) характеристика турбо кода при идеальной синхронизации, б) характеристика турбо кода при моделировании, в) характеристика турбо кода при практическом эксперименте

Полученные экспериментальные данные подтвердили результаты моделирования. Подтвержден прием данных со скоростью 100 Мбит/с при отношении энергии бита к спектральной плотности шума порядка $E_b/N_0 = 2.2$ дБ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана методика восстановления синхронизации высокоскоростного потока данных, основанная на алгоритмах Гарднера, Райфа-Бурстина, Витерби-Витерби. Обоснован выбор именно этих алгоритмов. Обоснован выбор применения турбо-кодов.

2. Разработана математическая модель радиоэлектронного тракта применительно к задачам моделирования процессов, протекающих в схемах синхронизации.
3. На основе результатов моделирования реализован тестовый образец демодулятора.
4. Разработан стенд для проведения практического эксперимента. Результаты проведенного стендового эксперимента подтверждают прием данных со скоростью 100 Мбит/с (модуляция ФМ-4) при отношении энергии бита к спектральной плотности шума E_b/N_0 2.2 дБ.
5. Результаты диссертационной работы внедрены в процесс разработки и проектирования приемо-передающей системы космического аппарата «Бауманец» в ЗАО НПП «САИТ», что подтверждено актом внедрения.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Круглик Е.А. Алгоритмы синхронизации высокоскоростных потоков данных при низких отношениях сигнал-шум. // Материалы 7-го международного форума «Высокие технологии XXI века» (Москва, 24 – 27 апреля 2006 г.) / Москва, 2006 г., с.277 – 278
2. Круглик Е.А. Реализация алгоритмов синхронизации высокоскоростных потоков данных при низких отношениях сигнал-шум // Приложение к журналу «Открытое образование» материалы XXXIII международной конференции IV международной конференции молодых ученых и специалистов «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + S&E06» (Гурзуф, Украина, 20 – 30 мая 2006 г.) / Москва, 2006 г., с. 217 – 218
3. Круглик Е.А., Кузьменко А.А., Сафронов Д.Н. Тактовая синхронизация высокоскоростного потока при малом значении сигнал-шум. // Техника и технология, 2006, №5, с. 23 – 30

4. Круглик Е.А., Кузьменко А.А., Сафронов Д.Н., Стругов С.А. Фазовая и частотная синхронизации высокоскоростного потока при малом значении отношения сигнал-шум. // Естественные и технические науки, 2006, №5 с. 177 - 181
5. Стругов С.А., Татарников А.В., Круглик Е.А., Юрова С.А. Модульный подход к построению тестирующего комплекса для цифровой аппаратуры бортового ретранслятора космического аппарата. // Естественные и технические науки, 2006, №5 с. 153 - 157
6. Стругов С.А., Татарников А.В., Круглик Е.А., Юрова С.А. Применение SCADA систем для тестирования и отладки цифровых управляющих систем спутниковой связи // Естественные и технические науки, 2006, №5 с. 182 – 183
7. Стругов С.А., Татарников А.В., Круглик Е.А., Юрова С.А. Реализация аппаратной части аппаратно программного комплекса отладки цифровой аппаратуры управляющей системы спутниковой связи на базе SCADA-системы // Естественные и технические науки, 2006, №5 с. 158 – 162

Отпечатано в ООО «Компания Спутник+»

ПД № 1-00007 от 25.09.2000 г.

Тираж 80 экз. Усл. п.л. 1,13

Печать авторефератов (095) 730-47-74, 778-45-60