

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 621.396.2

Маршрут автоматизированного проектирования устройств формирования и обработки сигналов для спутниковых навигационных систем

А.Г. Чебыкин, А.С. Меркутов

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Automated route design of building devices and signal processing for satellite navigation systems

A.G. Chebykin, A.S. Merkutov

Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs

Представлены модели аналоговой и цифровой частей приемника ГЛОНАСС, полученные с использованием среды моделирования Matlab Simulink. Исследованы возможности оценки характеристик аналоговой части приемника ГЛОНАСС в САПР ADS, предложен маршрут проектирования на основе построения сквозной модели радиоканала с использованием различных САПР. Рассмотренные модели расширяют возможности для проведения всесторонних исследований радиоканалов в области спутниковой навигации и модернизации существующих устройств приема и обработки сигналов системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: спутниковая навигация; ГЛОНАСС; приемник; модель; маршрут проектирования.

The models of the analog and digital parts of the GLONASS receiver, obtained using the simulation environment MATLAB, have been presented. The possibilities of estimating the characteristics of the GLONASS receiver analog part in ADS CAD have been investigated and the design route based on building the radio channel model using different CAD has been proposed. These models offer ample opportunities for further research in the field of satellite navigation and an improvement of the existing system GLONASS receivers.

Keywords: satellite navigation system GLONASS; the radio receiver; a radio channel model; modeling; design automation.

Введение. В настоящее время наблюдается интенсивное развитие технических средств поддержки спутниковых навигационных систем. Основные тенденции этого процесса: миниатюризация приемных и передающих устройств; снижение энергопотребления; реализация аналоговых и цифровых трактов в одном кристалле; широкое использование алгоритмических методов цифровой обработки сигналов и их реализация на базе цифровых сигнальных процессоров. Решить комплекс сложных научно-технических задач, возникающих в процессе разработки радиоустройств и систем, не представляется возможным без активного использования САПР, позволяющих не только значительно снизить сроки проектирования и материальные затраты, но и получить более высокие технические характеристики [1].

Несмотря на многообразие реализованных в большинстве САПР методов моделирования как на схемотехническом, так и на системном уровне, определенные трудности у разработчиков устройств приема и обработки радиосигналов с цифровой модуляцией встречаются при их выборе, параметризации и последовательности использования при выполнении сквозных проектов, требующих решения задач и отдельного, и смешанного моделирования [2].

Этапы маршрута проектирования. В настоящей работе рассматривается маршрут проектирования согласно типовой схеме [1], который реализован с использованием САПР Matlab и ADS. Схема маршрута приведена на рис.1. Для повышения эффективности использования математического обеспечения каждой из САПР предложено выполнять маршрут по этапам с учетом декомпозиции анализируемой модели системы и обмена данными на файловом уровне. Обоснование выбора САПР описано в работе [3]. Для построения и исследования моделей аналоговой части выбрана САПР ADS фирмы Agilent Technologies, которая предоставляет возможность выполнения проектных операций для различных иерархических уровней: топологического, схемотехнического, системного и электродинамического. Для проектирования цифровой части предложено использовать САПР Matlab, для которой характерна возможность формирования собственных отдельных программ с целью многократного их использования для исследований и применения практически всех вычислительных возможностей системы в режиме мощного научного калькулятора. Для синтеза полученных алгоритмов в ПЛИС выбрана САПР Xilinx ISE Design Suite, содержащая редактор схемотехнического ввода, редактор ввода на языках VHDL и Verilog, программу автоматического размещения и трассировки ПЛИС.

На начальном этапе проектирования проводится анализ и выбирается одна или несколько используемых в приемнике глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС): ГЛОНАСС (Россия), GPSNavstar (США), Galileo (Европейский союз), Beidou (Китай) [2]. Далее маршрут делится на две проектные процедуры, реализующие автоматизированное проектирование (АП) аналоговых и цифровых трактов соответственно.

Для реализации АП аналоговой части (рис.2) предложено использовать САПР ADS, математическое обеспечение которой включает широкий арсенал методов линейного и нелинейного анализа радиоустройств. На данном этапе выполняются следующие процедуры [4]: выбор и реализация структурной схемы, анализ частотных характеристик (ЧХ) преселекторного блока и оценка односигнальной избирательности, расчет точки компрессии, расчет точек интермодуляции 2-го и 3-го порядков, оценка паразитных комбинационных продуктов, формирование функциональной модели высокочастотного тракта в виде нелинейного многополюсника. В процессе выполнения этих процедур решаются задачи параметрического и структурного синтеза объекта проектирования (отработка структуры схемы и элементной базы, исследование процессов пре-

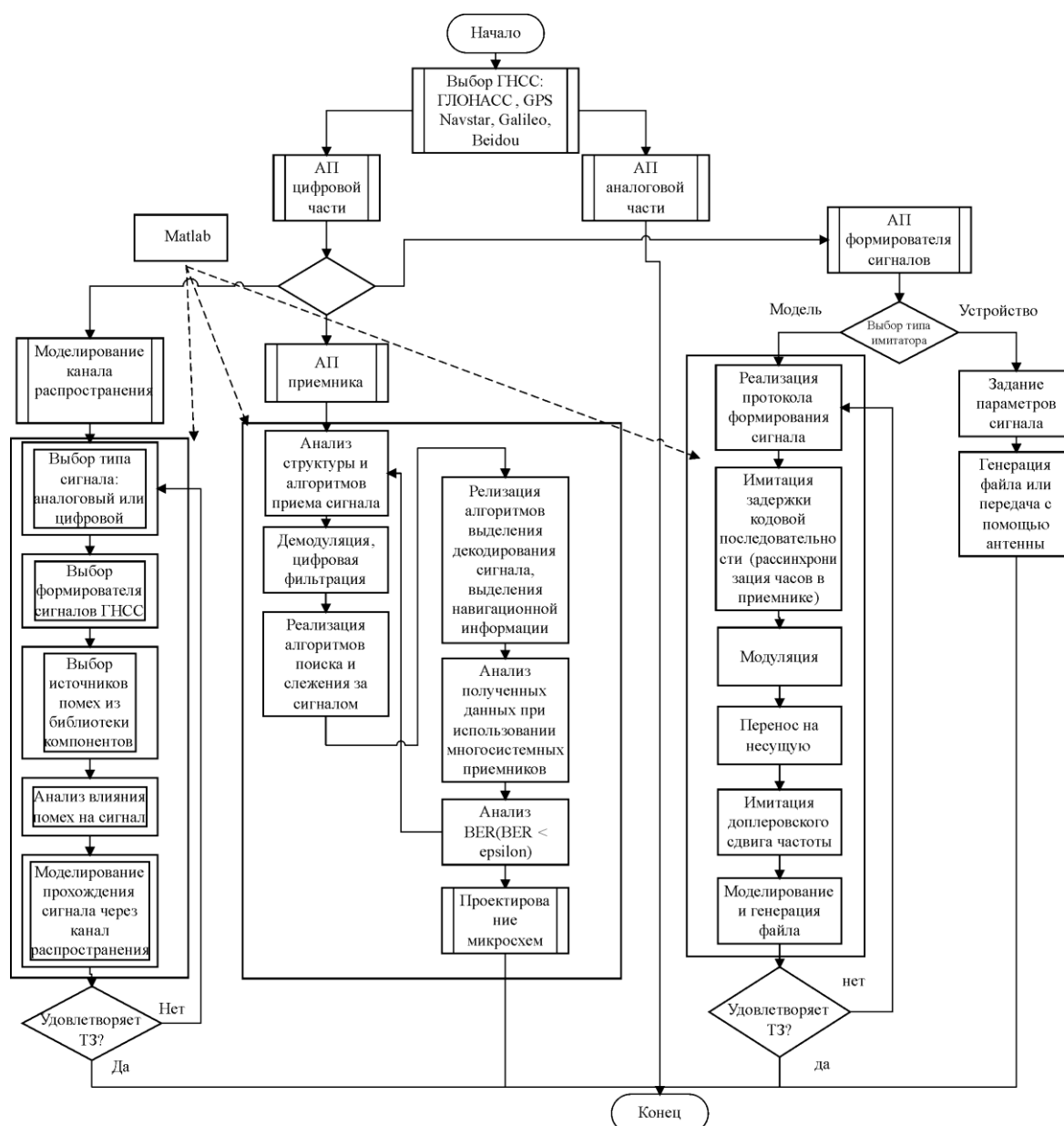


Рис.1. Маршрут проектирования спутниковых навигационных систем

образования сигналов при их прохождении через линейные и нелинейные тракты), т.е. аналоговой схемы приемника, и проводится анализ результатов моделирования. Построение модели сложных схем выполняется в два этапа. На первом этапе каждый физический элемент устройства (системы) представляется соответствующей моделью базового компонента. Второй этап – декомпозиция. Этот этап может быть также многоступенчатым, когда моделируемый элемент делится на более низкоуровневые компоненты, детализирующие процессы преобразования сигналов. Моделирование полной схемы при воздействии сложных модулированных сигналов может быть выполнено на основе метода огибающей сигнала [5, 6].

Проектирование цифровой части можно разделить на три проектные процедуры: моделирование канала распространения сигнала от спутника до приемника; моделирование приемника; моделирование устройства формирования сигналов.

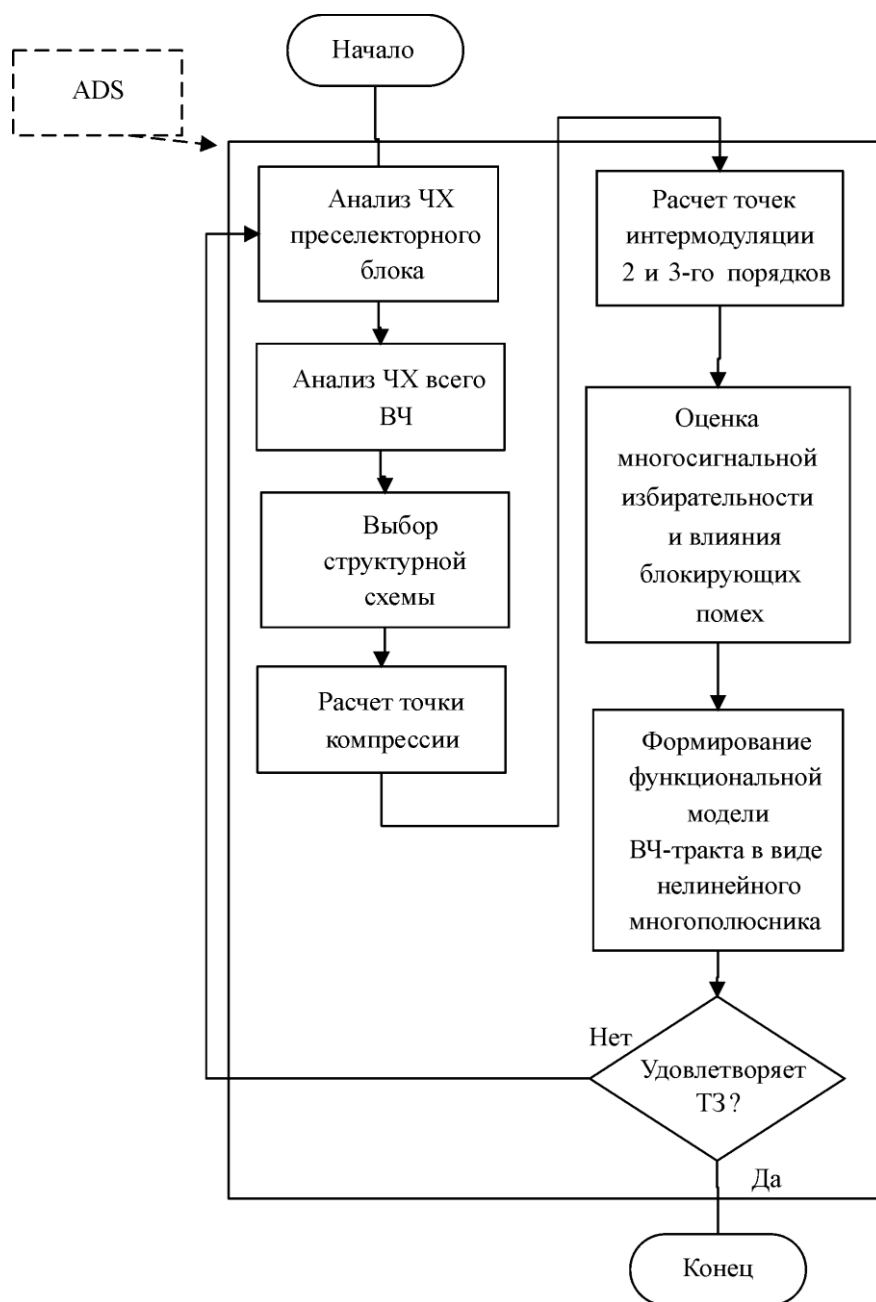


Рис.2. Процедура автоматизированного проектирования аналоговой части

Моделирование канала распространения включает в себя выбор типа сигналов (ГЛОНАСС, GPS и др.); выбор типа внешних замираний и модели распространения; выбор источников помех из библиотек компонентов; анализ влияния внешних помех на сигнал; моделирование прохождения сигнала через радиоканал. Здесь выполняется статистический анализ влияния внешних и внутренних факторов (теплового шума, селективного и неселективного замирания, многолучевого распространения и др.) на передаваемый информационный сигнал, целью которого является получение оценки рассеяния выходных параметров Y (количества ошибочно принятых бит) при заданных параметрах рассеяния X (параметрах компонента-источника помех). В качестве наиболее простого метода многовариантного анализа предложено использовать метод наилучшего случая – получение диапазона возможного рассеяния выходных параметров

без оценки плотности распределения этого рассеяния. Для обработки результатов исследования использовался регрессионный анализ, который дает возможность построить модель, наилучшим образом соответствующую набору данных, полученных в ходе машинного эксперимента. При проведении регрессионного анализа минимизируется функция ошибки, а в качестве такой функции используется сумма квадратов ошибок [5, 6].

При формировании входных сигналов принимается одно из двух решений: 1) использование какого-либо физического устройства (передатчика, генератора и др.), создающего сигналы навигационной системы. В этом случае потребуется задание параметров сигнала, его генерация в файл или передача; 2) реализация параметрического и структурного синтеза модели имитатора сигналов, состоящего из реализации (синтеза) протокола формирования сигнала, имитации задержки кодовой последовательности, модуляции, переноса на несущую, имитации доплеровского сдвига частоты, моделирования и генерации файла. Данная модель может рассматриваться как генератор заявок в системе массового обслуживания передатчик – приемник [5, 6].

Процесс АП приемника состоит из двух шагов: синтез модели на структурном и функциональном уровнях и топологический синтез. Структурный и функциональный синтез включает анализ структуры и алгоритмов приема сигналов, демодуляцию и цифровую фильтрацию, реализацию алгоритмов поиска и слежения за сигналом, реализацию алгоритмов выделения и декодирования сигналов, выделение навигационной составляющей, анализ полученных данных при использовании многосистемных приемников, анализ BER (BitErrorRate – количество ошибочных бит). Топологический синтез заключается в получении топологии кристалла (рис.3) сформированной цифровой модели приемника и выполняется на основании использования двух технологий: изготовление заказной микросхемы, включающее логический синтез, математическое моделирование, топологическое проектирование; технология на основе ПЛИС, включающая логический синтез, размещение и трассировку, анализ временных характеристик, формирование файла конфигурации [7].

На рис.4 показано взаимодействие применяемых САПР на маршруте АП при использовании имитационных моделей.

На первом этапе сгенерированный имитатором сигнала ГЛОНАСС текстовый файл с отсчетами модулированных аналоговых данных в программе Simulink конвертируется в формат, читаемый в среде ADS. Затем в подсистеме имитационного моделирования САПР ADS выполняется чтение сигнала, который проходит через функциональные блоки модели радиоканала, учитывающие различные факторы распространения сигнала (свойства антенн, многолучевость, временные и частотные замирания, воздействие помех и др.). В модели приемного тракта сигнал обрабатывается аналоговыми устройствами, которые могут быть представлены как на схемотехническом, так и на функциональном уровнях (малошумящий усилитель, смесители, фильтры преселектора и промежуточной частоты и др.) с использованием метода огибающей (Envelope), обладающего высокой эффективностью при моделировании прохождения модулированных сигналов через нелинейные радиочастотные цепи. При этом учитываются основные линейные и нелинейные параметры приемного тракта (коэффициент шума, точки компрессии и интермодуляции, селективные характеристики и пр.). На последнем этапе обработки в приемнике, после квадратурного разделения и переноса спектра на нулевую частоту, I -, Q -сигналы оцифровываются аналого-цифровыми преобразова-

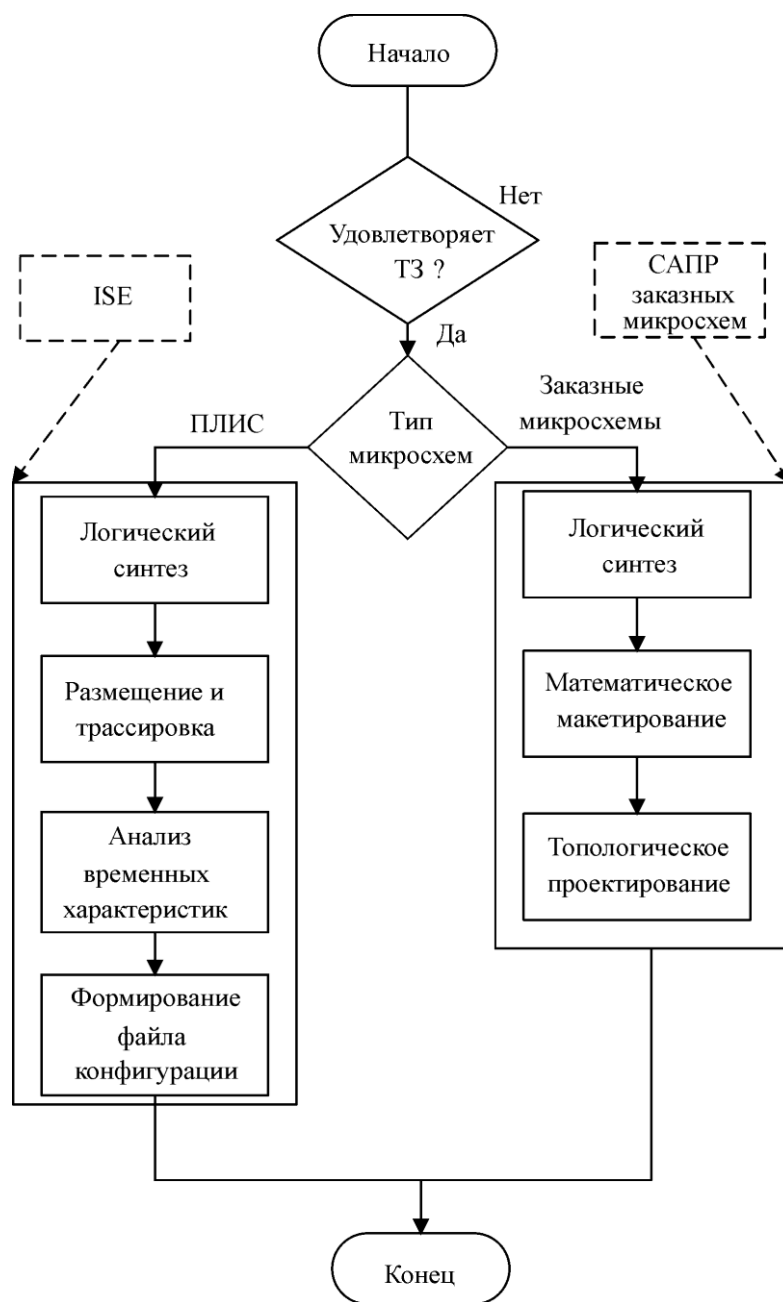


Рис.3. Процедура получения топологии кристалла

телями и записываются в текстовый файл, который конвертируется в формат, читаемый системой Matlab. Модели тракта цифровой обработки решают задачи поиска сигнала, фазовой и тактовой синхронизации, демодуляции, декодирования и выполняют расчет вероятностей битовой и пакетной ошибок на основании сравнения с оригинальным сигналом.

Для имитации прохождения цифрового дальномерного кода (без переноса спектра комплексной огибающей сигнала на несущую частоту) от спутника к приемнику сигнала ГЛОНАСС и сравнения его с GPS предложено использовать модель радиоканала, созданную в среде Matlab.

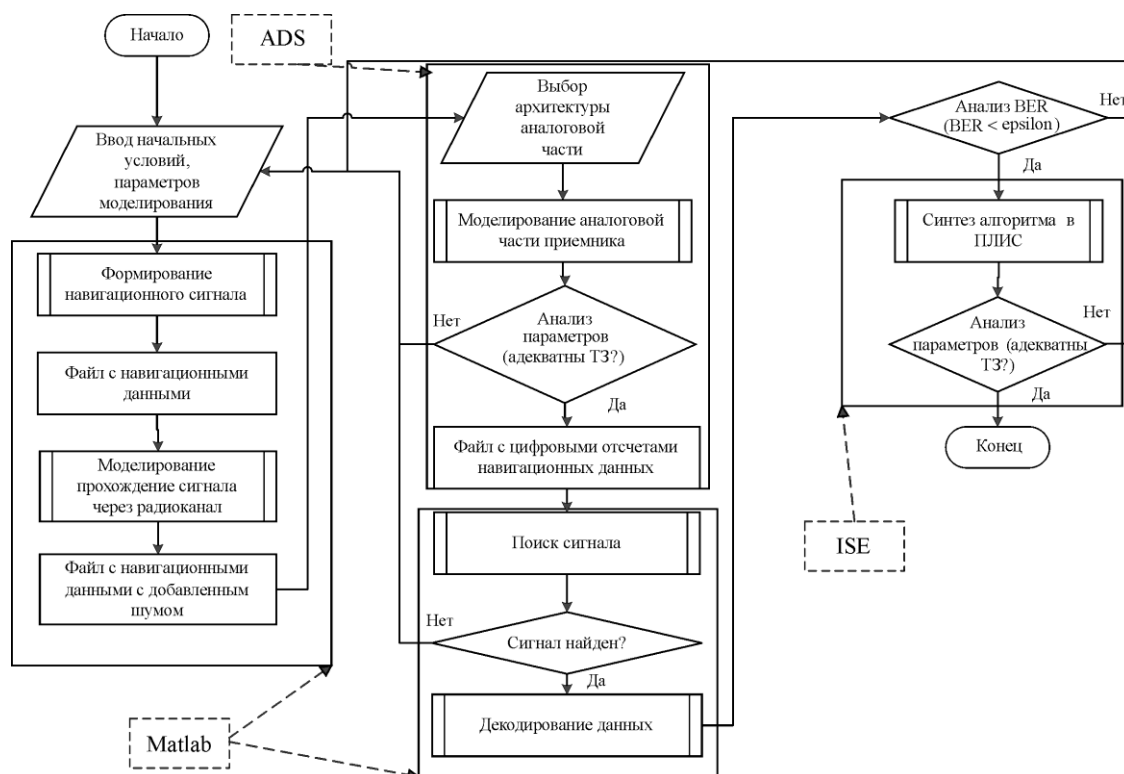


Рис.4. Совместное использование нескольких САПР

Модель цифровой части приемника можно синтезировать на языке описания аппаратуры с помощью модуля HDLCoder по технологии Software-in-the-Loop (см. рис.2) [8] и выполнить отладку с помощью EDACosimLink и САПР Modelsim.

Представленные в [9, 10] модели реализуют маршрут проектирования, показанный на рис.1, и позволяют провести регрессионный анализ влияния помех на сигнал, проходящий через радиоканал, методом наихудшего случая.

Приведем пример проведения регрессионного анализа с использованием модели формирователя сигналов ГЛОНАСС, модели канала передачи данных с релеевскими замираниями (рис.5) и модели декодера сигнала приемной части, реализованных в системе Matlab.

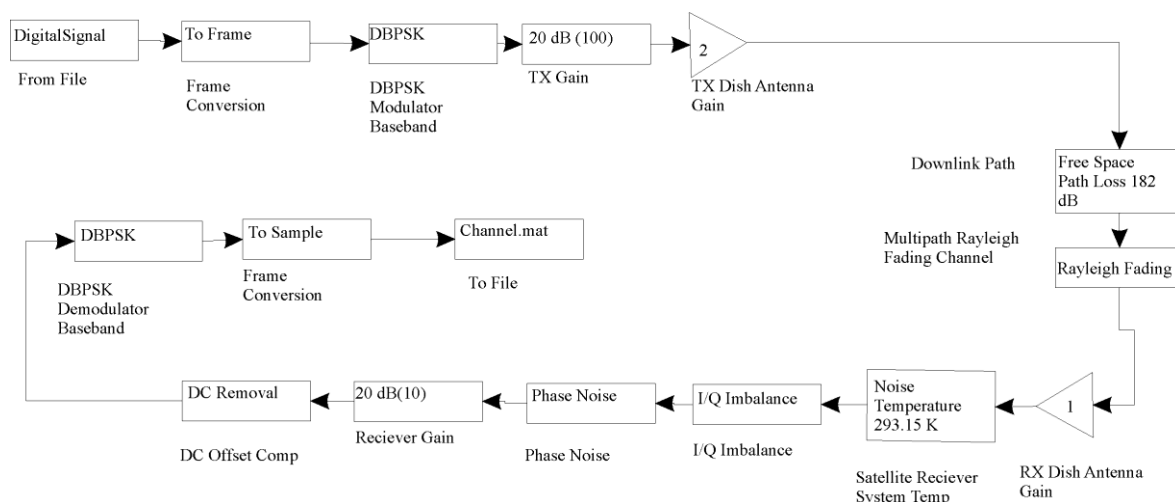


Рис.5. Модель канала передачи данных

В качестве независимых факторов использовались время задержек двух сигналов при переотражении в блоке многолучевого распространения сигнала; уровень фазовых шумов в трех точках (таблица); температура приемника. В качестве зависимого фактора выбран параметр BER.

Параметры, варьируемые при проведении эксперимента

Задержка (нс) при мощности –20 дБ		Температура приемника, К	Уровень шумов, дБн/Гц			BER, %
X1	X2		10 кГц	100 кГц	1 МГц	
X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y
1	1	273,15	–30	–50	–70	17,7
1	1	273,15	–50	–70	–90	3,6
1	1	293,15	–30	–50	–70	17,7
1	1	293,15	–50	–70	–90	3,7
1	100	273,15	–30	–50	–70	25,3
1	100	273,15	–50	–70	–90	23,7
1	100	293,15	–30	–50	–70	25,3
1	100	293,15	–50	–70	–90	24,1
10	1	273,15	–30	–50	–70	17,7
10	1	273,15	–50	–70	–90	3,5
10	1	293,15	–30	–50	–70	25,3
10	1	293,15	–50	–70	–90	3,8
10	100	273,15	–30	–50	–70	25,3
10	100	273,15	–50	–70	–90	23,7
10	100	293,15	–30	–50	–70	25,3
10	100	293,15	–50	–70	–90	24,1

В результате пошаговой линейной регрессии получено уравнение:

$$y = 75,705 - 0,4547 \cdot x_2 + 0,80291 \cdot x_6 - 0,0073233 \cdot x_2 \cdot x_6.$$

Заключение. По результатам исследований модели можно сделать следующий вывод. Наличие фазовых шумов в диапазоне отстройки до 100 кГц, время задержки при передаче сигнала по радиоканалу до 10 нс и температура приемника не оказывают сильного влияния на качество принимаемого сигнала. Однако значение битовой ошибки существенно возрастает при увеличении мощности фазовых шумов в полосе 1 МГц и времени задержки распространения сигнала от 10 до 100 нс.

Приведенный маршрут позволяет значительно сократить сроки и стоимость проектирования навигационных приемников по сравнению с традиционными подходами за счет:

- применения специализированных компонент моделей – аналоговых и цифровых трактов, ускоряющих подготовку проектов на системном и схемотехническом уровнях;
- согласования параметров радиочастотных и цифровых трактов на основе совместного моделирования, что устраняет необходимость неоднократного макетирования и экспериментального тестирования данных трактов в составе приемника на промежуточных этапах автоматизированного проектирования;
- возможности представления при совместном моделировании аналоговой части на схемотехническом уровне, а цифровой – на языке описания аппаратуры (VHDL) с уче-

том их взаимного влияния, что значительно повышает достоверность результатов моделирования;

- возможности проведения оценки качества использованных схемотехнических и алгоритмических решений в условиях искажений сигнала в реальном радиоканале (замирания, многолучевость, фазовые шумы и др.) только на основе моделирования.

Таким образом, предложенный маршрут обобщает алгоритмы проектирования приемных навигационных устройств на основании совместного использования различных САПР, что сокращает сроки выхода на рынок готового изделия и снижает затраты на дорогостоящее макетирование, которое выполняется только на финальной стадии разработки.

Литература

1. **Ланцов В.Н.** Основы автоматизации схемотехнического проектирования: учеб. пособие. – Владимир: Владимирский гос. техн. ун-т, 1996. – 88 с.
2. **Харисов В.Н., Перов А.И., Болдин В.А.** Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. – М.: ИПРЖР, 1998. – 395 с.
3. **Чебыкин А.Г., Меркутов А.С.** Построение моделей для формирователя сигнала системы ГЛОНАСС // Материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. – Рязань, Рязанский гос. радиотехнический ун-т, 2010 – С. 184–186.
4. **Меркутов А.С.** Маршрут автоматизированного проектирования радиоприемных устройств цифровых сигналов // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – №3. – С. 69–74
5. **Ланцов В.Н.** Моделирование. Ч. 1.: учеб. пособие. – Владимир: ВлГУ, 1999. – 88 с.
6. **Норенков И.П., Маничев В.Б.** Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры. – М.: Высш.шк., 1983. – 272 с.
7. **Плотников П.В.** Автоматизация проектирования систем цифровой фильтрации в базисах ПЛИС и заказных микросхем: дис. ... канд. техн. наук. – Владимир, 2008. – 172 с.
8. Verification, validation, and test with model-based design. – URL: http://www.mathworks.com/tagteam/53246_COMVEC%2008%20-%20VVnT%20with%20MBD.pdf (дата обращения: 03.03.2014).
9. **Чебыкин А.Г., Меркутов А.С.** Построение моделей для исследования методов обработки сигналов в мобильных приемниках системы ГЛОНАСС // Инновационные подходы к применению информационных технологий в профессиональной деятельности: сб. тр. 2-й Междунар. науч.-практ. интернет-конф. Белгородского филиала НАЧОУ ВПО СГА / Под ред. Н.В. Сокольской. – Белгород: ГиК, 2010. – С. 415–516.
10. **Чебыкин А.Г., Меркутов А.С.** Построение сквозных моделей радиоканалов для спутниковых навигационных систем // Проектирование и технология электронных средств. – 2012. – № 2. – С. 36–43.

Статья поступила
после доработки 22 апреля 2014 г.

Чебыкин Андрей Геннадьевич – аспирант кафедры вычислительной техники ВлГУ. *Область научных интересов:* методы и средства автоматизированного проектирования аналоговых и цифровых электронных устройств и систем; проектирование программно-аппаратных цифровых систем обработки информации на основе ПЛИС и заказных интегральных схем с использованием языков описания аппаратуры.

Меркутов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники ВлГУ. *Область научных интересов:* автоматизация проектирования радиоэлектронных устройств и систем, разработка методов моделирования нелинейных ВЧ- и СВЧ-устройств, разработка и тестирование телекоммуникационных устройств и систем. **E-mail:** merkutov@yandex.ru