

В. А. Вечтомов, К. А. Воробьев,
А. Н. Лебедев, Е. М. Лобов, С. В. Струков

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ЛИНИИ «ВВЕРХ»

Задача оптимизированного машинного проектирования бортовых радиотехнических устройств космического ретранслятора в настоящее время приобрело особую актуальность, в частности, при разработке ретранслятора с цифровой обработкой на борту, помехоустойчивым кодированием и пространственной фильтрацией активных и пассивных помех без участия земного контура управления. Описан программно-аппаратный комплекс, созданный на основе отечественной программной среды «Спектр-2», моделирующий функционирование радиотехнических устройств бортового ретранслятора в условиях воздействия активных и пассивных помех на линии «вверх».

E-mail: vechtomov@bmstu.ru

***Ключевые слова:** адаптивный процессор, антенна, космический ретранслятор, помехоустойчивое кодирование, пространственная фильтрация, ретранслятор, система спутниковой связи.*

В настоящее время исключительно актуальна задача разработки новых перспективных космических бортовых ретрансляторов (БРТК).

К перспективным БРТК спутниковой системы связи (ССС) предъявляются требования, прежде всего, расширения спектра предоставляемых услуг, улучшения качества передачи информации, защиты от пассивных и активных помех, а также несанкционированного доступа к информации, обеспечение передачи информации непосредственно к потребителю, минуя станции мультиплексирования.

Канал ССС должен обеспечивать передачу больших объемов информации и видеоизображения с большой четкостью в режиме реального времени, проведение видеоконференций, организацию телеобучения и телемедицины и т. п.

Еще одним требованием является существенное уменьшение размеров апертур антенн наземных станций, в особенности, для подвижной ССС, что позволит снизить их стоимость и расширить круг пользователей.

Основные требования, предъявляемые к перспективным ретрансляторам ССС:

- зональное обслуживание (ЗО) высокоэнергетическими узкими «игольчатыми» лучами бортовых антенн;

- наличие высокоскоростного канала связи, широкополосного и кодированного, включая ППРЧ (ППРЧ — псевдослучайная перестройка рабочей частоты), с защитой от активных помех;
- обработка информационных сигналов на борту, в том числе автоматическая внутрилучевая, межлучевая и межспутниковая коммутация сигналов на борту КА связи, уплотнение/разуплотнение пакетов при ЗО заданных территорий;
- реализация ствола в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) с использованием адаптивной многолучевой антенны (МЛА) с подавлением активных помех.

Использование бортового ретрансляционного комплекса «МЛА↔МБЦП» (МБЦП — мультисервисная бортовая цифровая платформа), является, пожалуй, единственным техническим решением, позволяющим разрешить проблему противоречивых тенденций современного развития ССС — роста трафика, пропускной способности и скорости передачи информации с одной стороны, и снижения стоимости, а, следовательно, и энерго-массогабаритных характеристик наземных антенных терминалов, с другой. В работах [1, 2] показана актуальность создания «МЛА↔МБЦП» для ССС.

Очевидно, что решение задачи построения такого БРТК лежит в области создания цифровой бортовой аппаратуры нового поколения.

Задача оптимизации построения перспективных БРТК не может быть решена без численного моделирования составляющей ее аппаратуры и построения модели функционирования космического ретранслятора в целом. В частности, важным моментом является определение сигнально-кодовых конструкций, обеспечивающих необходимую помехоустойчивость при заданных скоростях передачи информации. Необходимо также выбор алгоритма функционирования и схемы построения адаптивного процессора для формирования нуля в диаграмме направленности (ДН) в направлении на помеху. Алгоритмы работы адаптивного процессора и его программная реализация применительно к антенной решетке (АР) рассмотрены в работах [3—5].

Понятно, что задача оптимизации схемы построения перспективных БРТК многовариантна и требует предварительной оценки эффективности работы аппаратуры космического ретранслятора на численных моделях. Однако мощности современных программных комплексов моделирования, таких как Matlab и LabVIEW, недостаточно для численного моделирования процессов, протекающих в радиотехнических устройствах БРТК. Поэтому создание аппаратно-программного комплекса, имитирующего работу аппаратуры БРТК в части радиотехнических устройств, реализующих передачу информации на линии «вверх» является *актуальной*.

Структурная схема модели радиолинии «вверх» изображена на рис. 1. Модель радиолинии построена по модульному принципу.

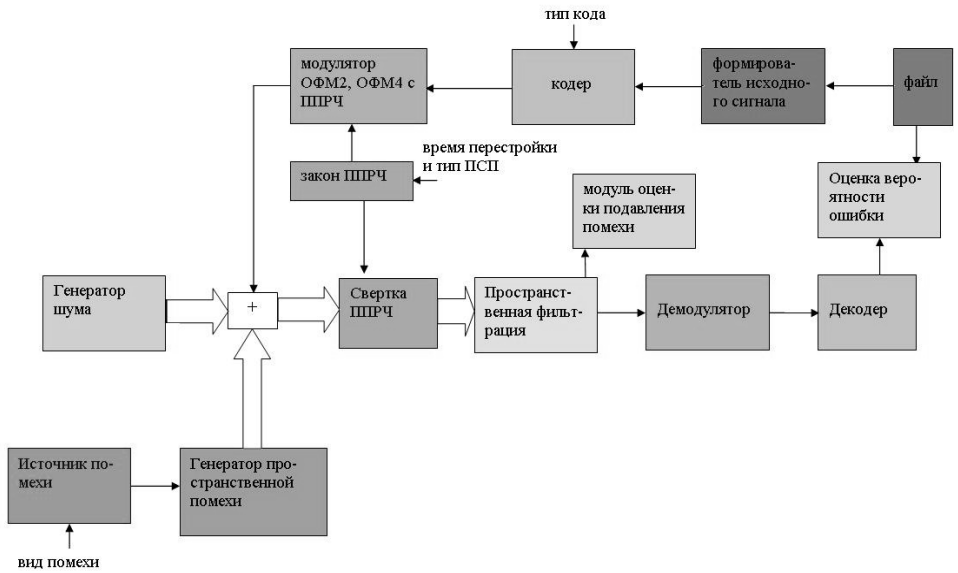


Рис. 1. Структурная схема модели радиолинии

Отдельные функциональные блоки могут быть индивидуально настроены или отключены.

Применение модульного принципа к моделированию радиолинии иллюстрирует рис. 2. Моделирующий программный комплекс состоит из графического интерфейса оператора и среды моделирования. Графический интерфейс предназначен для управления комплексом, редактирования исходных данных и отображения результатов расчетов.

В среде моделирования выполняются основные вычислительные функции процесса моделирования и взаимодействие модулей.

Алгоритм моделирования состоит из следующих шагов:

- с помощью графического интерфейса оператор включает или отключает отдельные функциональные блоки, задает их параметры; затем запускает процесс моделирования;
- данные из исходного файла (№ 1 на рис. 2), подлежащего передаче по моделируемой радиолинии, кодируются помехоустойчивым кодом; результат кодирования записывается в другой файл (№ 2 на рис. 2);
- автоматически запускается среда моделирования, которая считывает файл с закодированными битами данных;
- считанные биты подаются в модуль модулятора и схему формирования сигнала с ППРЧ. Формируется информационный сигнал;
- информационный сигнал, а также сигналы помех (сгенерированные соответствующим модулем) поступают в модуль АР. В модуле АР формируется групповой пространственный сигнал путем суммирования информационного сигнала и сигналов помех с учетом углов их прихода;

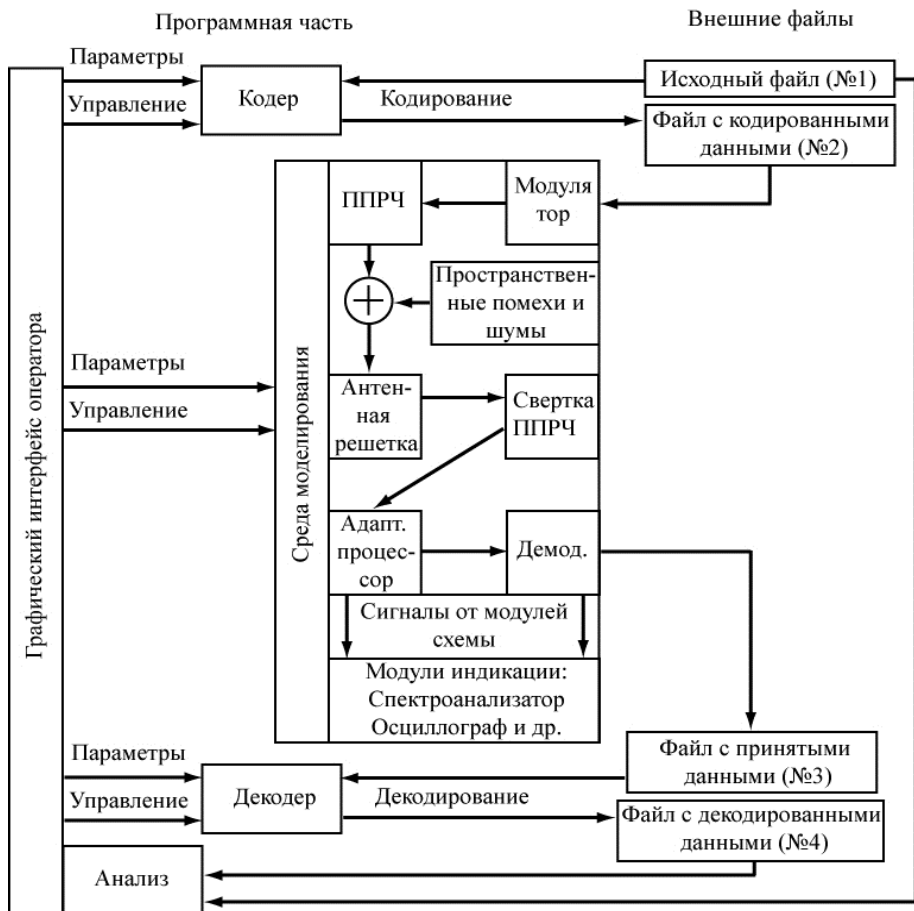


Рис. 2. Модель радиоканала, построенная по модульному принципу

- к групповому сигналу добавляется сигнал от модуля генерации белого шума;
- групповой сигнал выделяется после свертки ППРЧ и адаптивной пространственной режекции помех. После модуля режекции помех сигнал фильтруется в узкой информационной полосе и подается на демодулятор. Демодулированные биты данных, которые необходимо декодировать, записываются в выходной файл (№ 3 на рис. 2);
- по команде оператора процесс моделирования прекращается. При этом среда моделирования завершает работу, а информация из выходного файла (№ 3) подвергается декодированию с исправлением ошибок. Декодированные данные записываются в конечный файл (№ 4 на рис. 2);
- производится сравнительный анализ исходного и конечного файлов, после чего в интерфейсе оператора отображаются результаты сеанса моделирования: графики, отражающие отношение сигнал/шум и качество пространственной режекции помех в канале связи, статистика ошибочно принятых данных.

Модули помехоустойчивого кодирования и декодирования работают соответственно до и после непосредственного процесса моделирования. Это связано с тем, что для некоторых видов помехоустойчивых кодов (каскадного и турбо-кодов), процесс кодирования и декодирования требует значительных вычислительных затрат.

В графическом интерфейсе можно задать необходимые параметры указанных выше функциональных блоков:

- файл с данными для передачи;
- тип помехоустойчивого кода: сверточный, Рида — Соломона, БЧХ, турбо-код, каскадный код. Предусмотрена возможность отключения кодирования;
- параметры помехоустойчивых кодов: длина полинома и скорость кодирования для сверточного кода, размеры блоков кодирования для кодов БЧХ и Рида — Соломона, скорость кодирования для турбокода, конфигурация для каскадных кодов;
- режим модуляции: ОФМ-2 или ОФМ-4;
- уровень суммарной мощности атмосферного и собственного шумов приемного тракта относительно мощности полезного сигнала в широком диапазоне (от -120 до $+30$ дБ);
- количество пространственных помех, тип каждой помехи (гармоническая, амплитудно-модулированная, частотно-модулированная, помеха с ППРЧ, широкополосная помеха), пространственные углы прихода, уровень мощности относительно мощности полезного сигнала в диапазоне от -120 до $+30$ дБ;
- конфигурацию АР (прямоугольная или гексагональная), расположение фазового центра, число антенных элементов и межэлементное расстояние (в долях длины волны несущей частоты полезного сигнала);
- выбор алгоритмов адаптации АР для пространственной режекции помех (предусмотрена возможность отключения адаптации);
- пространственные углы прихода полезного информационного сигнала.

Варьируя указанные параметры, отключая и подключая отдельные функциональные блоки, можно моделировать работу аппаратуры БРТК в различных конфигурациях и условиях работы радиолинии.

Основой программного комплекса, созданного по модульному принципу, является разработанная в МТУСИ на языках C++ и Assembler виртуальная среда «Спектр-2», обеспечивающая возможность быстрой реализации программных версий устройств цифровой обработки сигналов [6—8]. Основной принцип построения моделей систем передачи информации в среде «Спектр-2» — создание набора отдельных блоков (виртуальных устройств) и предоставление пользователю возможности сборки из них работоспособной радиотехни-

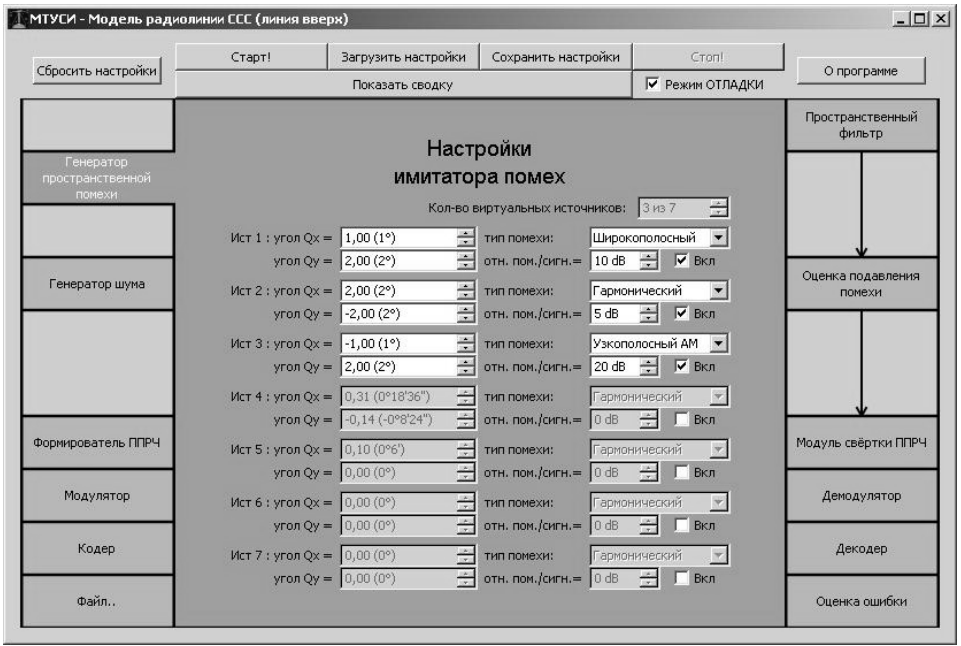


Рис. 4. Графический интерфейс оператора

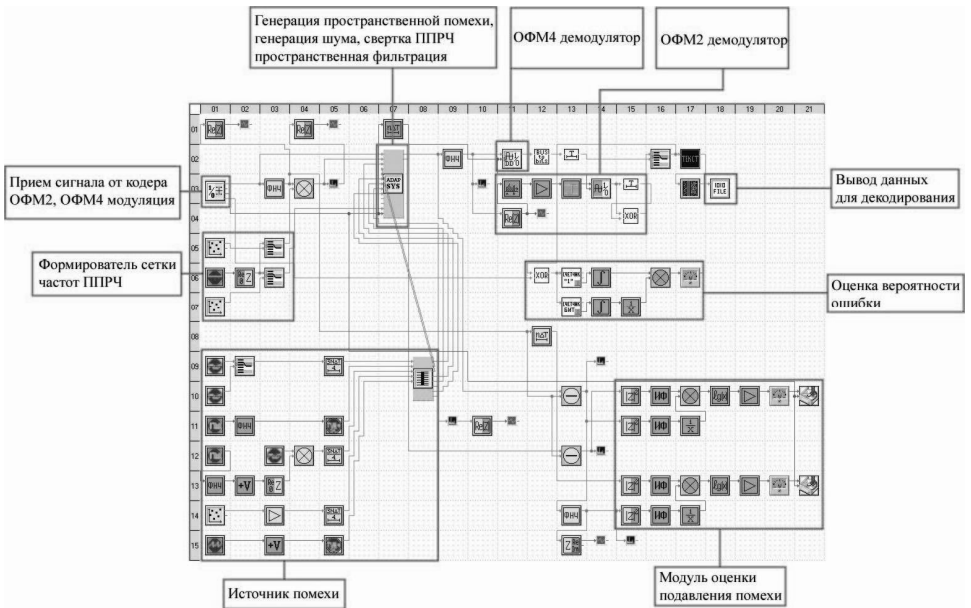


Рис. 5. Схема имитационной модели радиолинии, собранная из виртуальных устройств в «Спектр-2»

На языке C++ разработан усовершенствованный вариант модуля пространственной фильтрации для использования в среде «Спектр-2», реализующего имитацию пространственной помехи и ее режекцию по

RLS- или NLMS-алгоритму (оригинальная версия изложена в работах [3—5]). При необходимости, параметры моделирования могут быть непосредственно изменены в блоках, составляющих схему (см. рис. 5). Параметры некоторых блоков можно изменять в процессе функционирования программного комплекса, не останавливая процесс моделирования. Графическое изображение модуля антенной решетки и адаптивного процессора в рабочем пространстве «Спектр-2» показано на рис. 6.

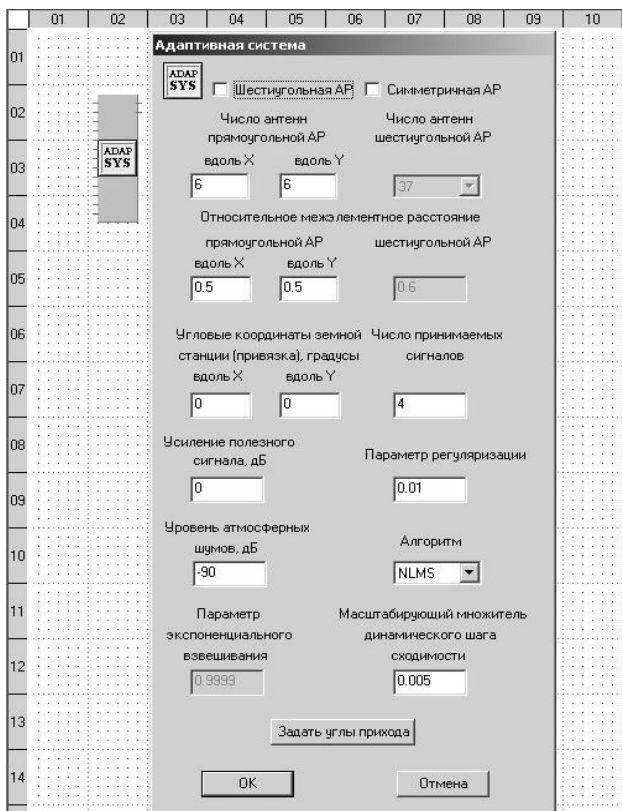







Рис. 6. Графическое изображение модуля АР и адаптивного процессора и окно настройки параметров

В процессе моделирования оператору доступны виртуальные устройства отображения: спектроанализатор , осциллограф , вольтметр , устройства построения фазового созвездия  и отображения текста  и др.

Окно спектроанализатора изображено на рис. 7. Во время моделирования оператор может наблюдать за уровнями мощности и формой спектра сигналов помех, передаваемого сигнала и остаточных шумов в канале связи.

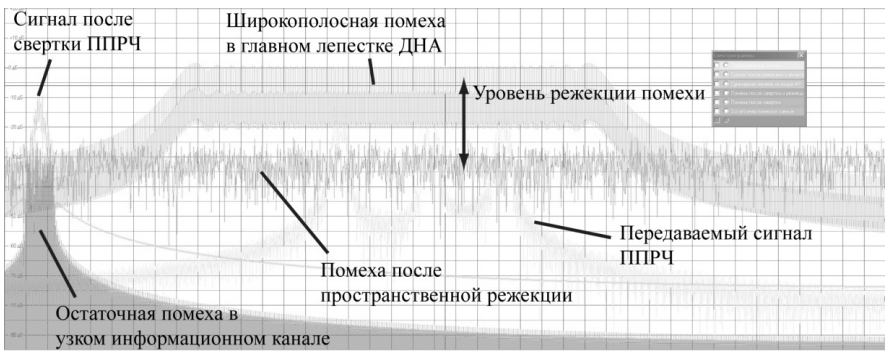


Рис. 7. Окно спектроанализатора во время моделирования:
ДНА — ДН антенны

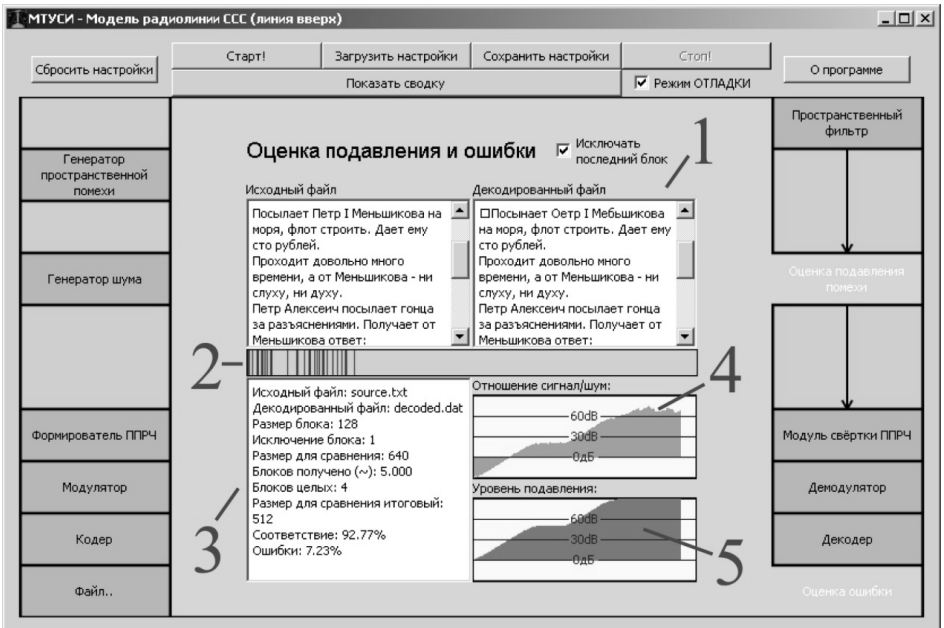


Рис. 8. Вкладка результатов моделирования в графическом интерфейсе оператора:

1 — текстовые поля для вывода содержимого исходного файла (№ 1) и файла декодированных данных (№ 4), для оценки соответствия переданных и полученных данных в текстовом виде; 2 — диаграмма, позволяющая визуально оценить наличие и расположение ошибочных символов в массиве принятой информации; 3 — сводка выходной статистической информации; 4 — отношение сигнал/шум (в дБ) в зависимости от времени, прошедшего с начала сеанса моделирования; 5 — оценка качества пространственной режекции помех [дБ] в зависимости от времени, прошедшего с начала сеанса моделирования

После остановки моделирования (нажатием кнопки «Стоп!», см. рис. 4), среда «Спектр-2» закроется, а после работы декодера и модуля оценки вероятности ошибки на экран будут выведены результаты моделирования (рис. 8).

Уровень качества режекции помех определяют по формуле

$$\eta = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right),$$

где P_1 — мощность помех на выходе АР; P_2 — мощность помех на выходе адаптивного процессора.

На рис. 7 отчетливо виден переходный процесс адаптации диаграммы направленности АР, который сопровождается увеличением уровня подавления помехи и отношения сигнал/шум.

Таким образом, предложен программно-аппаратный комплекс, моделирующий функционирование радиотехнических устройств бортового ретранслятора на линии «вверх» в условиях воздействия активных и пассивных помех.

Программно-аппаратный комплекс позволяет существенно сократить время, уменьшить стоимость разработки ряда радиотехнических устройств бортового космического ретранслятора и оценить априори их тактико-технические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верзунов Г. В. Бортовая обработка сигналов: перспективы и проблемы. Технологии и средства связи. – Спец. вып. – 2007. – С. 52–58.
2. Бортовая многолучевая антенна космического ретранслятора / Н.А. Бей, В.А. Вечтомов, Е.Н. Гуркин и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2009. – С. 8–17.
3. Djigan V. I. Joint use of constant modulus and least squares criteria in linearly-constrained communication arrays // Radioengineering: Proceedings of Czech and Slovak Technical Universities and URSI Committers. – 2007. – Vol. 16. – No. 4. – P. 88–95.
4. Джиган В. И. Адаптивные антенные решетки на базе СБИС серии «Мультикор» // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника. – 2008. – № 3. – С. 57–69.
5. Джиган В. И. Одновременное использование нескольких критериев в адаптивных антенных решетках // Доклады 10-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения (DSPA-2008)» (Российская академия наук: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, 26–28 марта 2008 г.). – М., 2008. – Т. 1. – С. 168–172.
6. Аджемов С.С., Лебедев А. Н. Программа для анализа радиотехнических систем и обработки радиосигналов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000611164, 2000.
7. Аджемов С. С., Лебедев А. Н. Программа для анализа радиосигналов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000611165, 2000.
8. Аджемов С. С., Лебедев А. Н. Имитационное моделирование радиотехнических систем и устройств цифровой обработки сигналов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612096, 2007.
9. Программный комплекс, моделирующий линию «вверх» системы спутниковой связи / В.А. Вечтомов, К.А. Воробьев, А.Н. Лебедев и др. // Материалы XVI Междунар. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2010. – Т. 2.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012