

Математическое моделирование электромагнитной обстановки на борту космического аппарата

А.Н. Дементьев

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Российская Федерация, г. Москва
пр. Вернадского, 78

Математическая модель электромагнитного взаимодействия технических средств космического комплекса это математический аналог реального процесса, проходящего под воздействием внешних воздействующих факторов окружающей среды. Актуальной становится задача адаптации математических моделей космического аппарата к реальной электромагнитной обстановке на его борту и обеспечения выбора минимально необходимых и достаточных схмотехнических решения для обеспечения помехозащищенности радиоэлектронных средств.

Ключевые слова: помехозащищенность, математическое моделирование, чувствительность приемника, системы спутниковой связи.

В настоящее время анализ реализуемости требований технического задания в части помехозащищенности радиоэлектронных средств космических систем и комплексов проводится двумя способами:

1. Аналитический (расчетный) метод реализует выполнение требований помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры к внешним воздействующим факторам космического пространства.

2. Экспериментальный метод позволяет определить уровни помех от «полезных» радиоэлектронных средств, расположенных на борту космического аппарата. Реализация требований по помехозащищенности изделий проходит по результатам лабораторных и стендовых испытаний собранного изделия, с учетом принятых схмотехнических решений, а условия достижения заданных требований к аппаратуре определяются опытным путем.

Несомненно, технология анализа, основанная на практических измерениях отличается высокой точностью и достоверностью, но требует больших материальных и временных затрат, а также наличия готовых макетов устройств. Наиболее распространенным способом анализа обеспечения помехозащищенности космического аппарата (КА) является метод аналитических оценок с расчетом «худшего» случая. Этот метод гарантирует большие энергетические запасы при расчете одновременной работы техниче-

ских средств КА, но с другой стороны требует схмотехнических решений, которые влекут за собой увеличения масса-габаритных характеристик изделия.

В связи с этим актуальной становится задача по адаптации математических моделей космического аппарата к реальной электромагнитной обстановке на его борту и обеспечения выбора минимально необходимых и достаточных средств помехозащищенности. Такой подход позволил бы:

– сократить большую часть экспериментальных работ и тем самым существенно экономить временные и материальные ресурсы;

– обосновать количественные показатели, требуемые для обеспечения эффективного использования радиочастотного спектра и необходимости снижения излучений при отсутствии потери качества приема информации;

– увеличить срок активного существования (САС) изделия, путем сокращения общей массы полезной нагрузки и увеличения объема рабочего тела двигателя КА.

Математическая модель электромагнитной обстановки на космическом аппарате это математический аналог реального процесса, проходящего под воздействием внешних воздействующих факторов окружающей среды. Она строится на основе комплекса частных моделей: радиотехнических элементов (антенн, фильтров, кабелей); радиочастотных портов (фидеров),

корпусов, внешнего электромагнитного поля, проводов связанных кондуктивно и индуктивно.

Достоверность модели определяется параметрами, ее описывающими. Для современной космической системы это количество может достигать несколько сотен тысяч. Большую часть параметров составляют значения коэффициентов подавления приемников суммарным сигналом.

Для решения поставленной задачи информация должна быть структурирована, храниться и извлекаться оптимальным для пользователя образом, быть минимально избыточной, целостной и достаточной.

Для обеспечения хранения подобной информации обычно используют реляционные база данных, а в качестве технологии доступа к данным принята одна из существующих современных технологий BDE фирмы Borland. Кроме того, для разработки программного обеспечения используются электронные таблицы (или табличные процессоры) – это прикладные программы, предназначенные для проведения табличных расчетов. Данное средство информационных технологий, позволяет решать целый комплекс задач, и прежде всего вычислений. Многие расчеты выполняются в табличной форме, кроме того, в табличной форме удобно выполнять решение численными методами целого ряда математических задач.

Для анализируемого набора РЭС космического аппарата с учетом циклограммы работы и уровней помехоустойчивости определяются условия беспомехового функционирования РЭС. Помехи, которые могут проникать через антенны, оцениваются путем выявления частот, попадающих в полосы основного и побочных каналов приема. Частоты представляют собой основные и побочные излучения радиопередающих устройств и результаты комбинационных излучений.

Критерием качества функционирования РЭС в сложной электромагнитной обстановке является превышение допустимого отношения «сигнал/помеха» по входу приемника. Для сокращения объема комбинаций частот передачи и приема, уровней мощности, чувствительности и гармонических составляющих, радиочастотный анализ проводится в несколько итераций.

С целью решения задачи помехозащитности изделий, группой специалистов РГУ МИРЭА, создана типовая математическая модель размещения и функционирования технических средств космического аппарата с привязкой к реальной электромагнитной обстановке.

В разработке программы «ЭМС объектов» принимали участие Дементьев А.Н., Новиков И.Г. Арсеньев К.В. (РТУ МИРЭА), Назаров Ю.Б. (АО «НПО Лавочкина»), Копылов А.А. (ФГУП ЦНИИмаш). Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016613384.

Материалы данной статьи направлены на описание программного обеспечения, демонстрацию полученных результатов и возможности внедрения программного продукта (технологии) в процесс создания новых бортовых телевизионных систем и устройств передачи информации, в том числе и телеметрических, с целью повышения их помехозащитности.

На первом этапе вычислений рассматривались все возможные пары приемник-передатчик. После каждой итерации производится процесс отбора, те комбинации приемник-передатчик, в которых электромагнитные помехи весьма маловероятны (отношение «сигнал/помеха» ко входу приемника не превышает допустимого значения с требуемым запасом) в последующих расчетах не рассматриваются.

Анализ каждой пары приемник-передатчик разбивается на четыре составляющие:

- анализ влияния излучения передатчика на основной канал приемника;
- анализ влияния излучения передатчика на побочные каналы приемника;
- анализ влияния излучения передатчика на гармониках на основной канал приемника;
- анализ влияния излучения передатчика на гармониках на побочные каналы приемника.

Исходные данные для проведения расчетов разделены на основные и дополнительные [1].

Основные исходные данные вводятся перед первой итерацией, когда рассматриваются все возможные помеховые ситуации. Эти данные представляются в виде таблиц:

- данные по приемникам;
- данные по передатчикам;
- численные значения расстояния между антеннами приемников и передатчиков.

В таблицах по приемникам и передатчикам должны быть указаны места расположения антенн в единой системе координат.

Дополнительные исходные данные вводятся при необходимости перед каждой итерацией и представляют собой следующие характеристики:

- коэффициент усиления антенны передатчика в направлении антенны приемника;

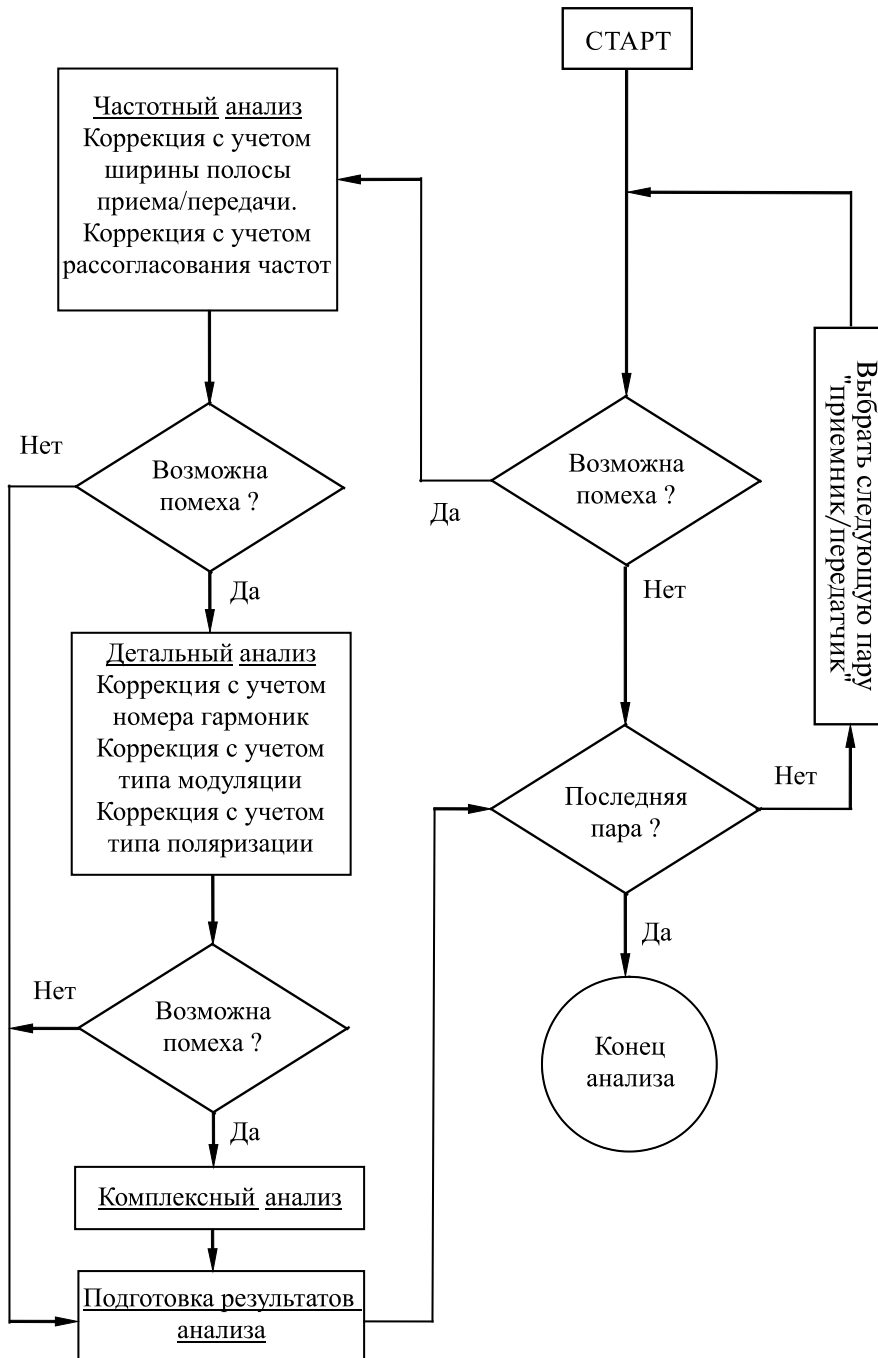


Рис. 1

– коэффициент усиления антенны приемника в направлении антенны передатчика;
– уровень излучения передатчика на гармониках;
– чувствительность приемника по побочным каналам приема.

Алгоритм расчета по казан на рис. 1.

Состав программного обеспечения для расчета помеховых воздействий выглядит следующим образом:

– Backup\ – каталог с файлами резервных копий БД;
– DataBase\ – каталог с файлами БД;

– Models\ – каталог с файлами 3D модели;
– Report\ – каталог с файлами отчетов;
– Settings\ – каталог с файлами индивидуальных настроек интерфейса;
– Update\ – каталог с файлами обновлений;
– Ionic.Zip.dll – библиотека классов;
– kemsApplication.exe – основной исполняемый модуль;
– kemsApplication.exe.config – файл хранения настроек запуска основного исполняемого модуля;
– kemsApplication.vshost.exe – файл процесса основного исполняемого модуля;

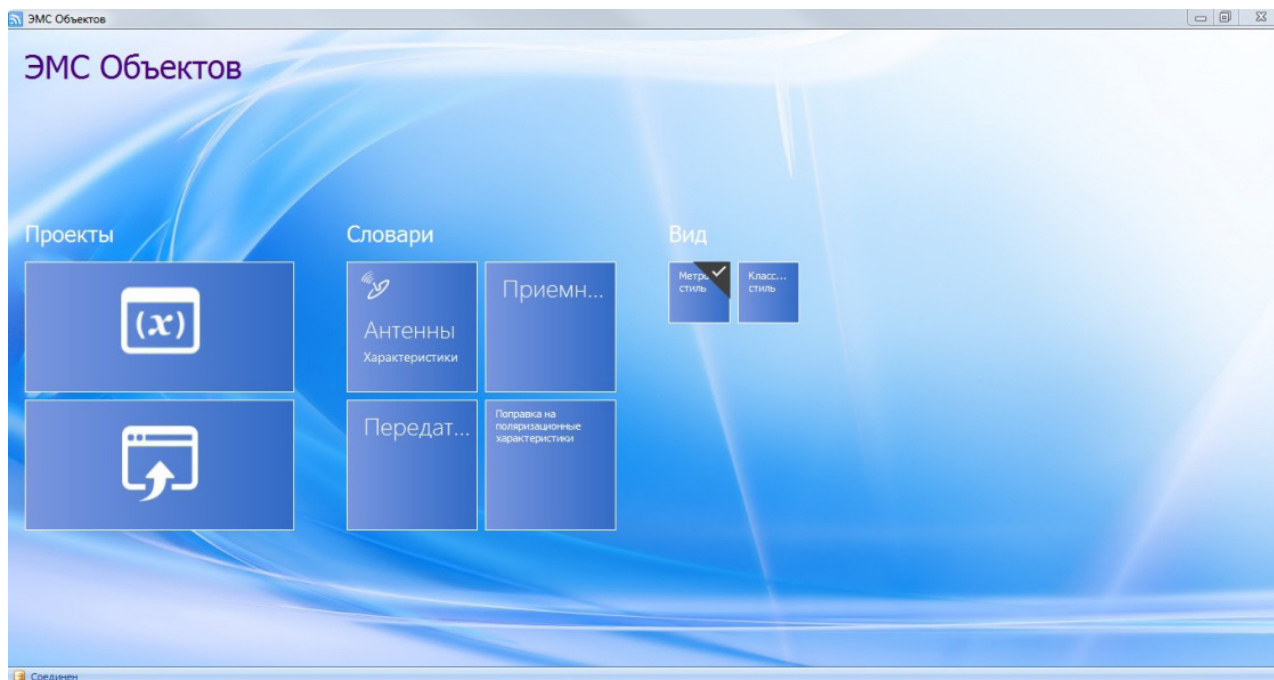


Рис. 2

- kemsMath.dll – библиотека классов математических методов;
- main.ico – логотип исполняемого файла;
- Master.license – файл лицензированного доступа к программе;
- System.Numerics.dll – библиотека классов пространства имен;
- System.Windows.Interactivity.dll – библиотека классов;
- System.Xaml.dll – библиотека классов;
- VisualClassLibrary.dll – библиотека классов.

Интерфейс программного обеспечения представлен системой пользовательских окон с элементами управления типизированными для Windows. На рис. 2 представлено главное окно меню.

Программное обеспечение разработано на основе технологии «клиент-сервер» с использованием СУБД MS SQL Server. База данных предназначена для централизованного хранения данных в разрезе:

- проектов (набора различных справочных данных и их связей);
- справочников (передатчик, приемник, антенна, поправка на поляризационные характеристики);
- результатов расчета, в том числе в виде трехмерного отображения.

Использование СУБД MS SQL Server позволяет сохранять все проведенные расчеты. Каждый расчет представляется в виде отдельного проекта.

Перечень функций, реализуемых в программном обеспечении:

- ввод и хранение различных конфигураций объектов (проектов);
- хранение проведенных расчетов;
- хранение справочной информации;
- расчет помехозащищенности радиоэлектронных средств;
- отображение результата расчета в графическом виде;
- анализ и подбор решений;
- настройка графического оформления (стиля) окон;
- выбор вида главного окна;
- создание пользователей и ролей для разграничения прав доступа;
- обновление базы данных после восстановления из резервной копии;
- создание резервной копии БД и сохранение в отдельном файле;
- восстановление данных из резервной копии БД;
- редактирование шаблона отчетной формы.

Информационное обеспечение основано на подключении программных модулей к базе данных (БД). К базе данных подключатся трехмерная математическая модель с помощью специального модуля, который в реальном времени осуществляет обмен информацией с БД.

Обновление базы данных осуществляется с помощью файлов резервных копий, получаемых с помощью выполнения специальных команд

Наименование	Частота(Гц)	Полоса передачи(Гц)	Мощность(дБ)	Полоса передач.Мин(Гц)	Полоса передач.Макс(Гц)	Длина волны(м)
UM_2	3 410 000 000	10 000 000	10,00	3 405 000 000	3 415 000 000	0,088
UM_1	3 410 000 000	10 000 000	10,00	3 405 000 000	3 415 000 000	0,088
tt	149 730 000	250 000	1,00	149 605 000	149 855 000	2,004
Tr9	11 481 250 000	54 000 000	21,00	11 454 250 000	11 508 250 000	0,026
Tr8	11 168 750 000	54 000 000	17,00	11 141 750 000	11 195 750 000	0,027
Tr7	11 168 750 000	54 000 000	17,00	11 141 750 000	11 195 750 000	0,027
Tr6	11 106 250 000	54 000 000	17,00	11 079 250 000	11 133 250 000	0,027
Tr5	11 106 250 000	54 000 000	17,00	11 079 250 000	11 133 250 000	0,027
Tr4	11 043 750 000	54 000 000	17,00	11 016 750 000	11 070 750 000	0,027
Tr3	11 043 750 000	54 000 000	21,00	11 016 750 000	11 070 750 000	0,027
Tr2	10 981 250 000	54 000 000	17,00	10 954 250 000	11 008 250 000	0,027
Tr16	11 668 750 000	54 000 000	17,00	11 641 750 000	11 695 750 000	0,026
Tr15	11 668 750 000	54 000 000	21,00	11 641 750 000	11 695 750 000	0,026
Tr14	11 606 250 000	54 000 000	17,00	11 579 250 000	11 633 250 000	0,026
Tr13	11 606 250 000	54 000 000	17,00	11 579 250 000	11 633 250 000	0,026
Tr12	11 543 750 000	54 000 000	17,00	11 516 750 000	11 570 750 000	0,026
Tr11	11 543 750 000	54 000 000	21,00	11 516 750 000	11 570 750 000	0,026
Tr10	11 481 250 000	54 000 000	17,00	11 454 250 000	11 508 250 000	0,026
Tr1	10 981 250 000	54 000 000	21,00	10 954 250 000	11 008 250 000	0,027
TEST	386 137 500	10 000 000	10,00	381 137 500	391 137 500	0,777

Рис. 3

Project <555> X

Состав Расчет

Итоги расчета Расчет фильтров Частотный анализ

Канал Приемник Полоса частота. Мин(Гц) Полоса частота. Макс(Гц) Передатчик. 1 Гармоника.1 Передатчик. 2 Гармоника.2 Комбинац частота.Мин(Гц) Комбинац частота.Макс(Гц) Помеха(дБ) Защитный интервал(дБ)

Омо... с_ПРМ... 149 605 000 149 855 000 Solo 0 1 149 605 000 149 855 000 1,00 -36,00

Вкладки Расчет Детали расчета

График воздействия помехи

Детали расчета

Канал Основной РЭС_ПРМ_24

Полоса частота. Мин(Гц) 149 605 000

Полоса частота. Макс(Гц) 149 855 000

Передатчик. 1 Solo

Гармоника. 1 0

Передатчик. 2 1

Гармоника. 2 1

Передатчик. 2 Комбинац частота.Мин(Гц) 149 605 000

Комбинац частота.Макс(Гц) 149 855 000

Помеха(дБ) 1,00

Защитный интервал(дБ) -36,00

Приём(дБ) -90,00

Результат 36,00

Фильтр расчётный Фильтр проекта

Частота (Гц) Подделение (дБ)

Графический результат расчета ЭМС

Информация по фильтрам

Рис. 4

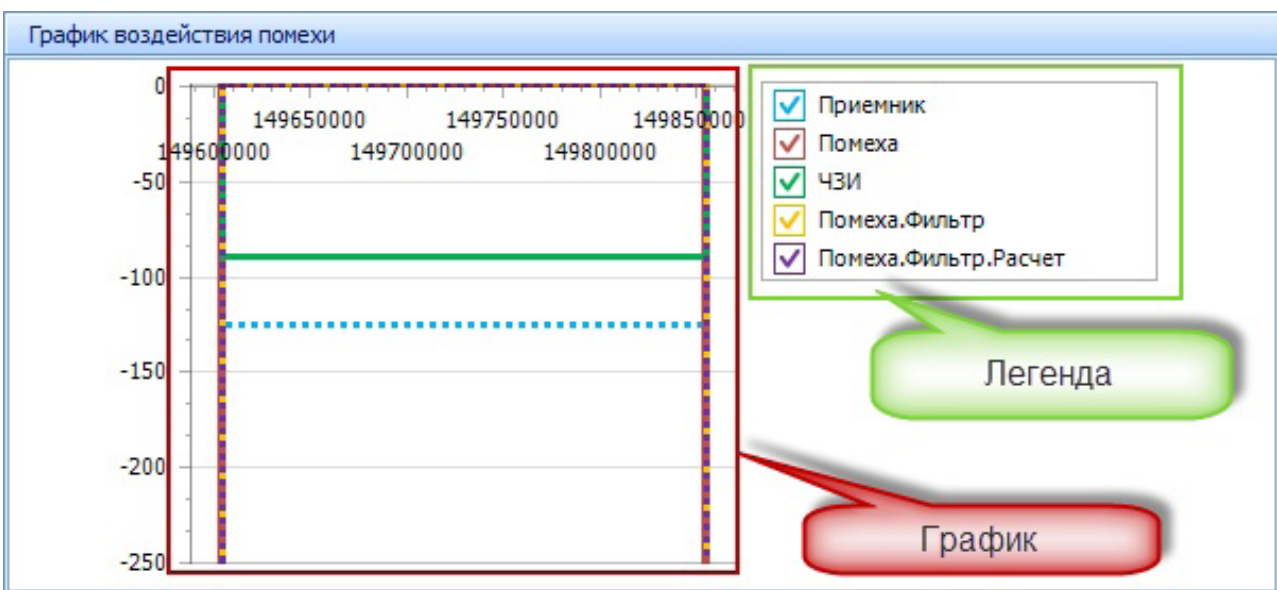


Рис. 5

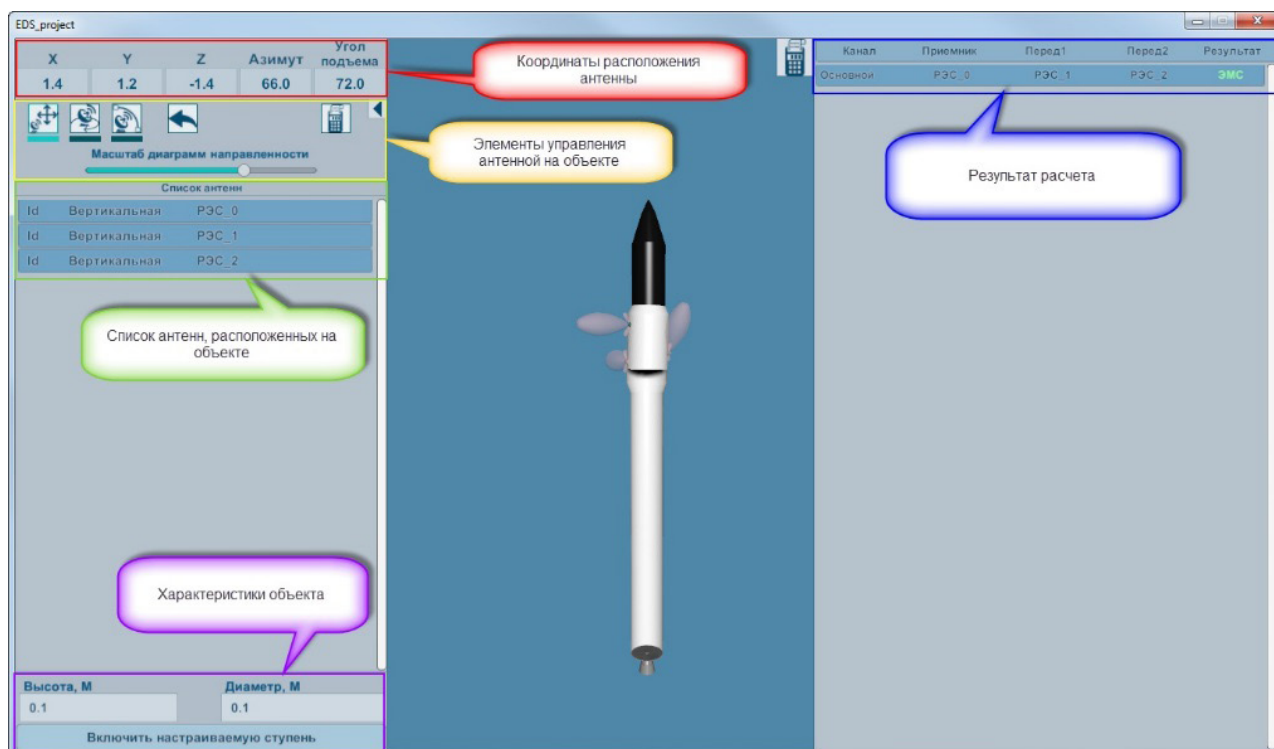


Рис. 6

из раздела «Администрирование». Полученные файлы можно передавать по электронной почте или на сменном носителе. База данных представляет собой совокупность таблиц, словарей, каталогов, хранимых процедур, хранимых пользовательских функций и отбора рис. 4.

Вкладка «Передатчик» (рис. 3) содержит информацию по радиопередающим устройствам.

Вкладка «Итоги расчета» содержит следующую информацию:

- название проекта;
- меню команд управления записями проекта;
- вкладки: «Итоги расчетов», «Расчет фильтров», «Частотный анализ»;
- поле для отображения результатов расчета ЭМС;
- графический результат расчета ЭМС;
- детали расчета;
- информацию по фильтрам.

Меню команд управления записями проекта включает следующие команды:

- расчет – производит расчет ЭМС введенных объектов;
- загрузка 3D-модели – загружает модуль для трехмерного отображения результатов расчета;
- печать – выводит на печать содержимое окна;
- экспорт – позволяет сохранить в различных форматах;

– расчет фильтров – осуществляет переход на вкладку «Расчет фильтров» и производит вычисление и подбор оптимальных фильтров;

– отчет – производит выгрузку полученных результатов в форму отчета с последующей возможностью печати или сохранения в файл.

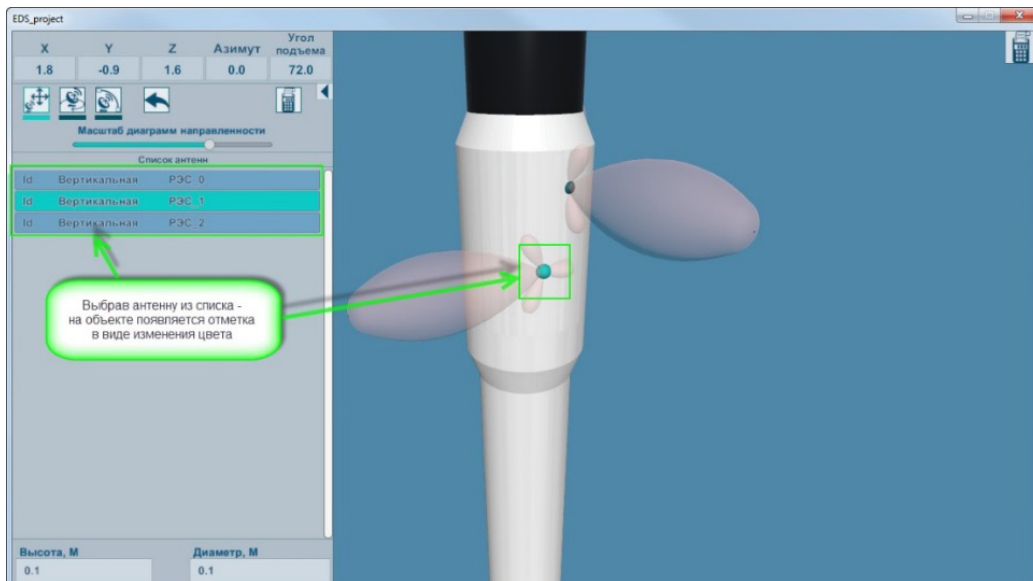
Отображение результатов расчета происходит в графическом виде рис. 5. Графический результат расчета отображается в правой нижней части экрана «График воздействия помехи». В данной области отображается график и его легенда. График позволяет наглядно проанализировать полученные результаты. Легенда позволяет производить выбор графиков, необходимых заказчику.

В поле «Детали расчета» отображается информация аналогичная полю «Расчет», но отображаемая построчно, с целью более удобного анализа графика.

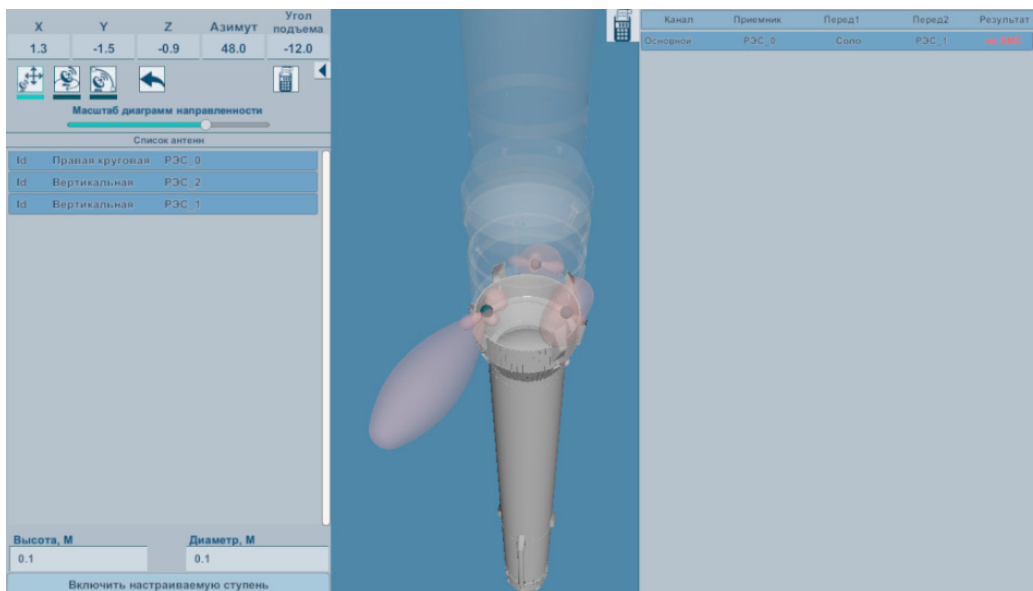
Существует возможность подключения модуля 3D для имеющихся проектов, как показано на рис. 6 и 7. Для удобства использования перед первым запуском на экран выводится подсказка инструкция по работе с 3D моделью.

В окне 3D модели имеются следующие основные элементы:

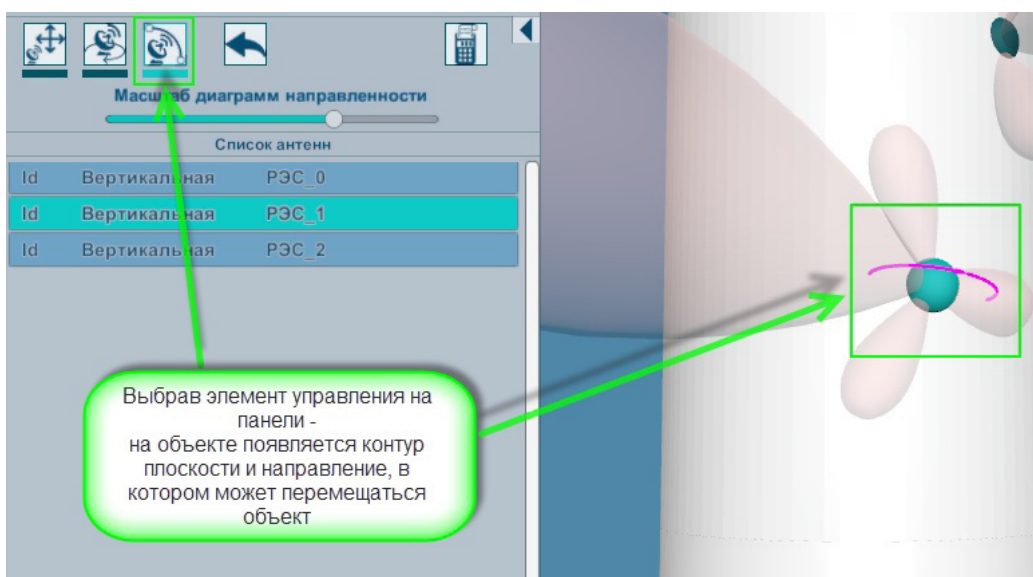
- координаты расположения антенны;
- элементы управления антенной на объекте;
- список антенн, расположенных на объекте;



а)



б)



в)

Рис. 7

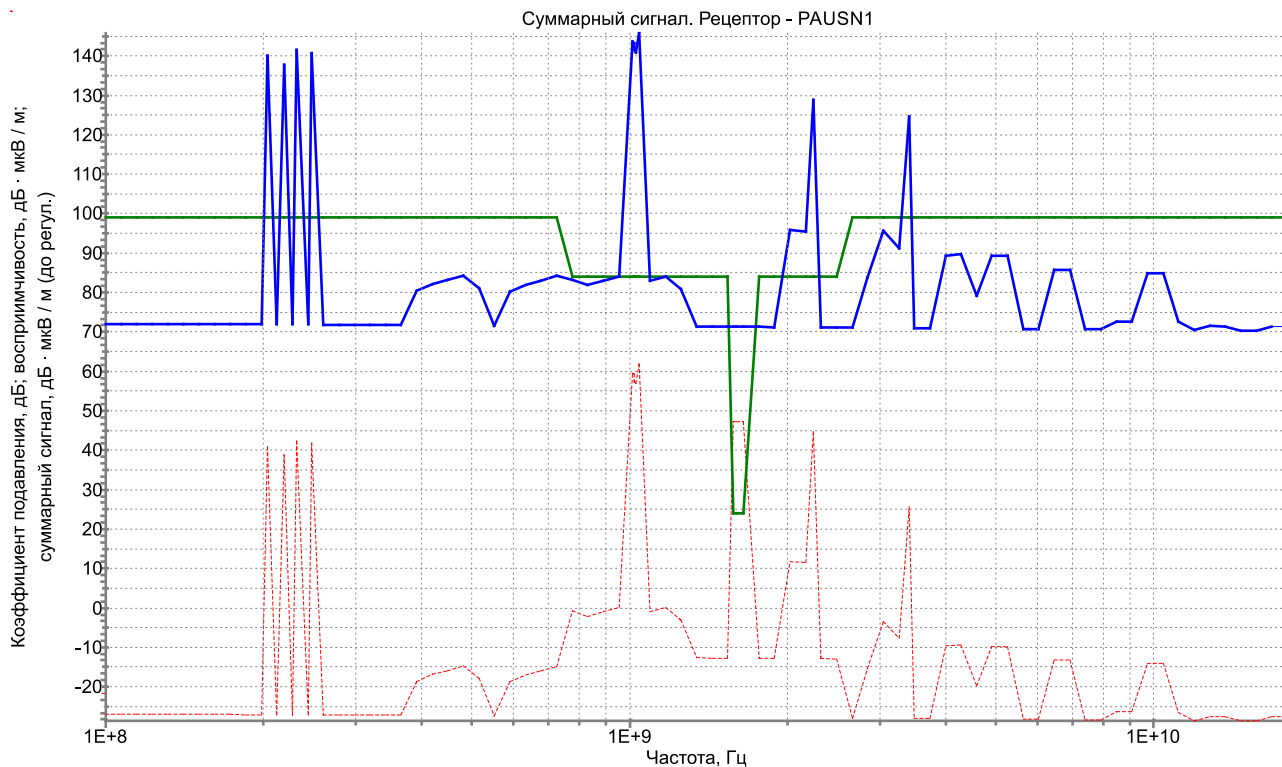


Рис. 8

- характеристики объекта;
- результат расчета.

Для взаимодействия с антенной, необходимо выбрать ее, нажатием левой клавиши мыши в списке антенн на панели слева, либо по основанию диаграммы направленности. После выбора антенны можно использовать один из трех режимов взаимодействия. Все взаимодействия происходят путем перемещения мыши с зажатой левой клавишей на основании диаграммы направленности.

После проведения необходимых изменений (координат размещения антенны или изменения расположения диаграммы направленности) необходимо выполнить расчет с учетом измененных характеристик [2].

Функция анализа и подбора решений по обеспечению помехозащищенности РЭС содержит следующие вклады:

- элементы управления записями;
- поле для расчета фильтров;
- наименование приемника;
- уровень расчетных фильтров.

Встроенный «Дизайнер отчетов» позволяет создавать или редактировать отчетные формы для результатов расчетно-аналитической оценки, как в табличном, так и в графическом виде. В ходе исследований рассмотрено влияние частотных каналов радиопередающих устройств на частотные каналы радиоприемных. В резуль-

тате проведенного математического моделирования было выявлено возможное проникновение помех по основному, зеркальному и каналу радиоприемников.

Так, например, с использованием математического моделирования проведена оценка помехозащищенности радиотехнических систем расположенных на борту ракеты-носителя «Ангара-А5» [3].

Оценка помехи приемника, подключенного к антенне с координатами $x = 7.311$ м, $y = -0.214$ м, $z = 2.038$ м, показала, что максимальный коэффициент подавления равен 59,6 дБ на частоте 1.01 ГГц. Основной вклад в суммарную помеху (152 дБ·мкВ / м) вносит излучение передатчика подключенного к антенне с координатами $x = 7.311$ м, $y = -1.973$ м, $z = 0.556$ м. В рабочей полосе частот приемника коэффициент подавления суммой побочных излучений составляет 47,3 дБ (рис. 8).

Максимальное воздействие суммарной помехи на приемник (рецептор PASN1 приемника, координаты антенны $x = 17.471$ м, $y = 2.060$ м, $z = 0$ м), создают передатчик (порт P1341, уровень 149 дБ·мкВ / м) подключенные к антенне с координатами $x = 17.471$ м, $y = 1.888$ м, $z = 0.613$ м (коэффициент подавления равен 77,6 дБ на частоте 1.0265 ГГц) и передатчики (порт PBRM1 с координатами $x = 17.471$ м, $y = 1.410$ м, $z = -1.410$ м, уровень 148,5 дБ·мкВ / м и порт

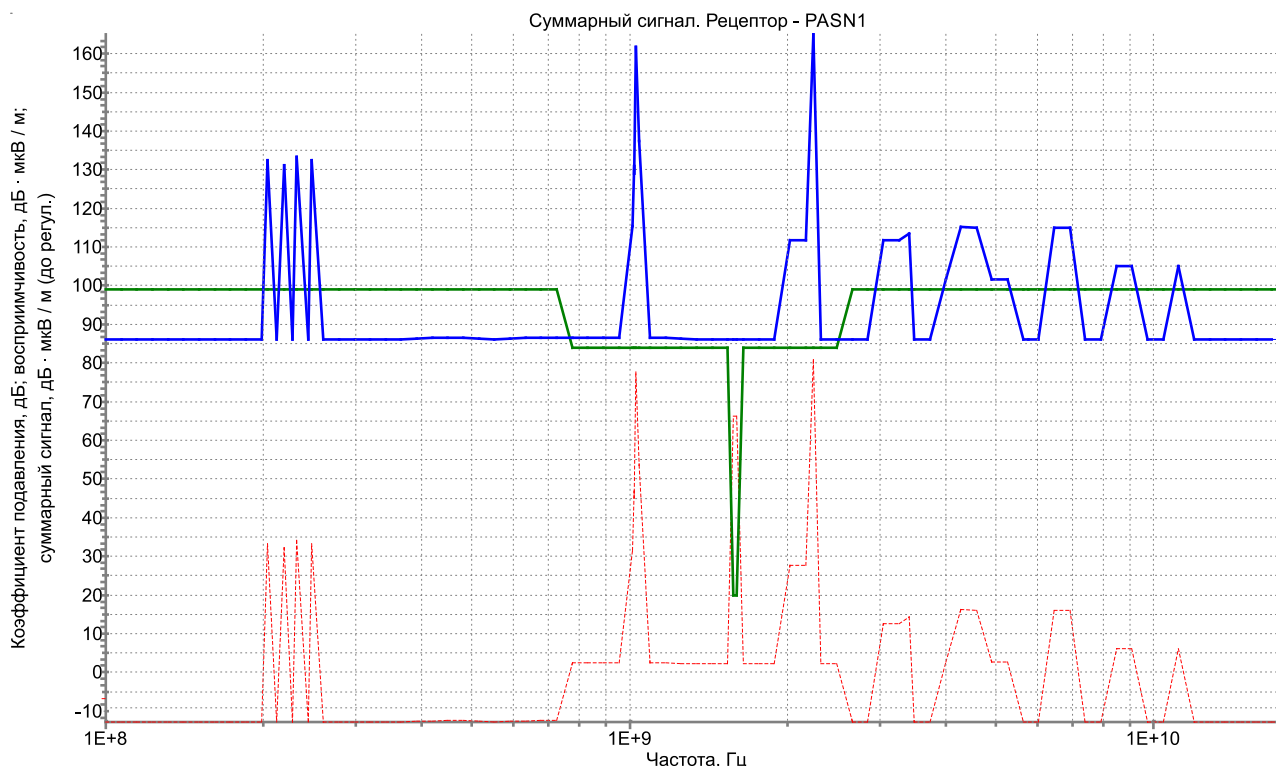


Рис. 9

PBRM2 с координатами $x = 17.471$ м, $y = 1.728$ м, $z = 0.997$ м, уровень 148,5 дБ · мкВ / м.

Коэффициент подавления равен соответственно 76,8 дБ и 78,9 дБ на частоте 2.234 ГГц (рис. 9). Возможно проникновение помехи по основному каналу, с учетом чувствительности (–163 дБ · Вт) и защитного интервала (16 дБ), от комбинационных частот различных пар передатчиков. В столбце «Помеха» указывается значение мощности излучения на комбинационной частоте на входе приемника. В столбце «Прием» указывается значение превышения мощности излучения на комбинационной частоте относительно чувствительности приемника и защитного интервала.

В результате проведения математического моделирования частотной составляющей возможно проникновение помех:

- по основному каналу приемников;
- по зеркальному и каналу промежуточной частоты приемника.

С целью исключения помехового воздействия на технические средства космического аппарата сформированы следующие рекомендации.

1. Разделение проводов и кабелей на группы производится так, чтобы в одну группу попали цепи, сигналы в которых соизмеримы по уровням мощности и близки по форме и структуре. Группировкой разделяются также цепи, являющиеся источниками и рецепторами помех.

Проводные цепи по параметрам восприимчивости (чувствительности) к помехам и уровням создаваемых помех классифицируются следующим образом:

- цепи сильных постоянных и переменных токов (а также цепи с негармоническими сигналами) со значениями токов более 0,5 А;
- слаботочные цепи питания постоянного и переменного тока со значениями токов менее 0,5 А;
- цепи с дискретными (цифровыми) логическими сигналами;
- цепи контроля пиротехнических устройств и других слаботочных потребителей с повышенными требованиями к надежности;
- цепи управления и контроля с аналоговыми сигналами;
- цепи питания потенциометрических, пьезо- и термодатчиков системы телеметрии.

Все цепи выполняются с максимально возможной степенью симметрии относительно корпуса. Использовать корпус изделия в качестве обратного провода не разрешается. Не разрешается также использование одного провода в качестве обратного для нескольких симметричных цепей. Прямой и обратный провод прокладывается в одном кабеле и вводится в прибор через один разъем.

2. Применение витых пар проводов. Ответственные цепи выполняются с перевивом пря-

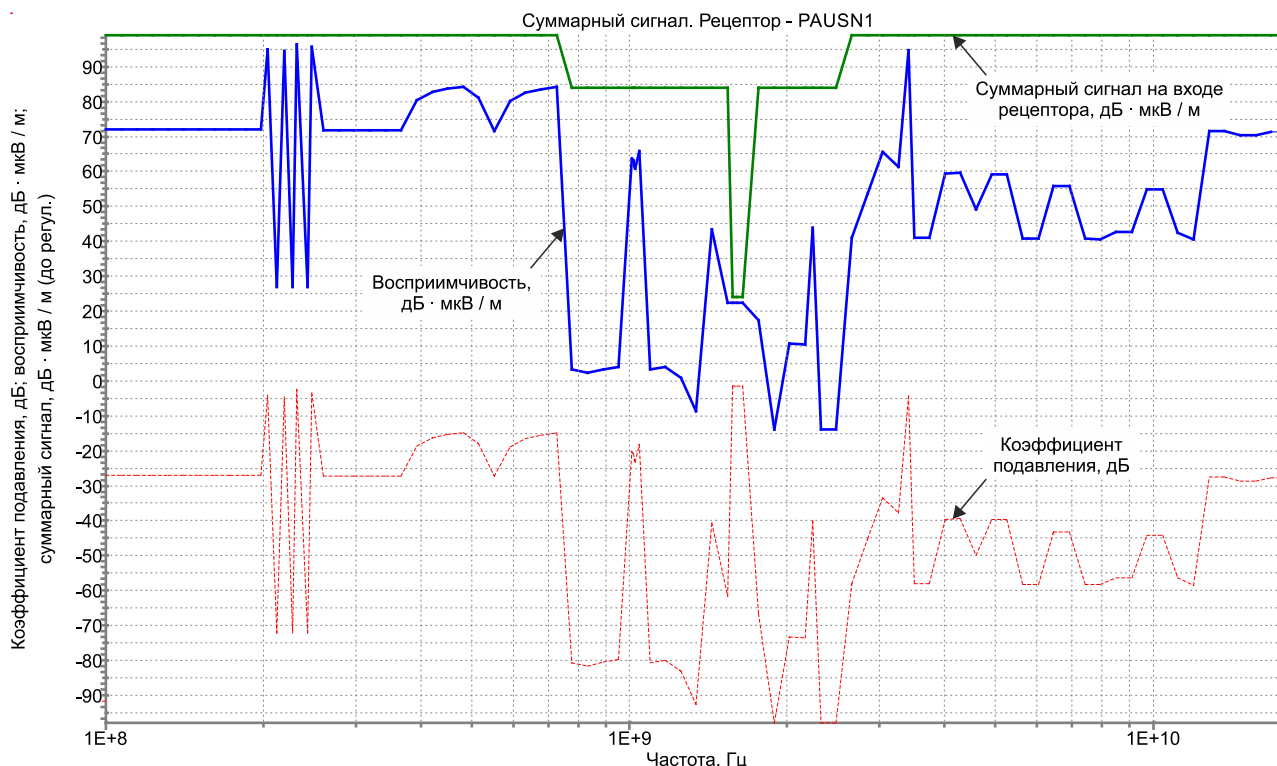


Рис. 10

мого и обратного проводов. Шаг скрутки выбирается в зависимости от сечения и проводов в соответствии с рекомендациями, приведенными в ОСТ 92-0286-80. Предпочтительным является применение стандартных витых пар проводов.

3. Кабельные разъемы (соединители) применяются с выводом экранов на корпус соединителя или специальные соединители типа РСЭ, МРЭ, РРСЭ или СР. Экраны цепей и общий экран кабеля имеют электрическое соединение с корпусом соединителя. В кабелях с особыми требованиями к экранированию место соединения экрана кабеля с корпусом соединителя должно быть опаяно по всему периметру. В ответственных случаях требуется минимизация переходных сопротивлений «экран-соединитель» до значений 0,2 мОм.

4. Способом уменьшения шумов в аппаратуре является ограничение полосы пропускания до значения необходимой ширины полосы сигнала. При этом длительность импульсов и время нарастания (спада) сигнала выбираются так, чтобы их спектр совпадал с требуемой полосой частот. Основные паразитные связи приборов возникают по первичной сети питания. Для подавления этих связей на входах приборов установлены помехоподавляющие фильтры.

5. Для уменьшения импульсных помех в контактных устройствах (реле, коммутаторы и т. п.) используются искрогасящие схемы, которые

уменьшают максимальные токи и напряжения в коммутирующих цепях и крутизну их перепадов.

6. Экранирование. Мощные источники помех (радиопередатчики, преобразователи, источники питания и др.) с уровнями, превышающими нормы, конструктивно исполняются в экранированных корпусах.

С учетом проведенного математического моделирования и полученных результатов, предлагаем принять следующие меры:

1. В антенно-фидерные тракты приемников включены полосно-заграждающие фильтры FNAP с ослаблением -45 дБ в полосе 203...248 МГц, с ослаблением -80 дБ в полосе 0,75...1,43 ГГц, с ослаблением -85 дБ в полосе 1,8...2,5 ГГц и с ослаблением -30 дБ в полосе 2,6...12,5 ГГц.

2. В антенно-фидерный тракт телеметрического передатчика включены полосно-заграждающий фильтр FSTI с ослаблением -50 дБ в полосе 1,5...1,7 ГГц.

3. В антенно-фидерный тракт телеметрического передатчика РБ КВТК включены полосно-заграждающий фильтр с ослаблением -40 дБ (FPIRIT114) и ослаблением -70 дБ (FPIRIT134) в полосе 1,5...1,7 ГГц.

4. В антенно-фидерный тракт передатчика включен фильтр с ослаблением -65 дБ в полосе 1,5...1,7 ГГц.

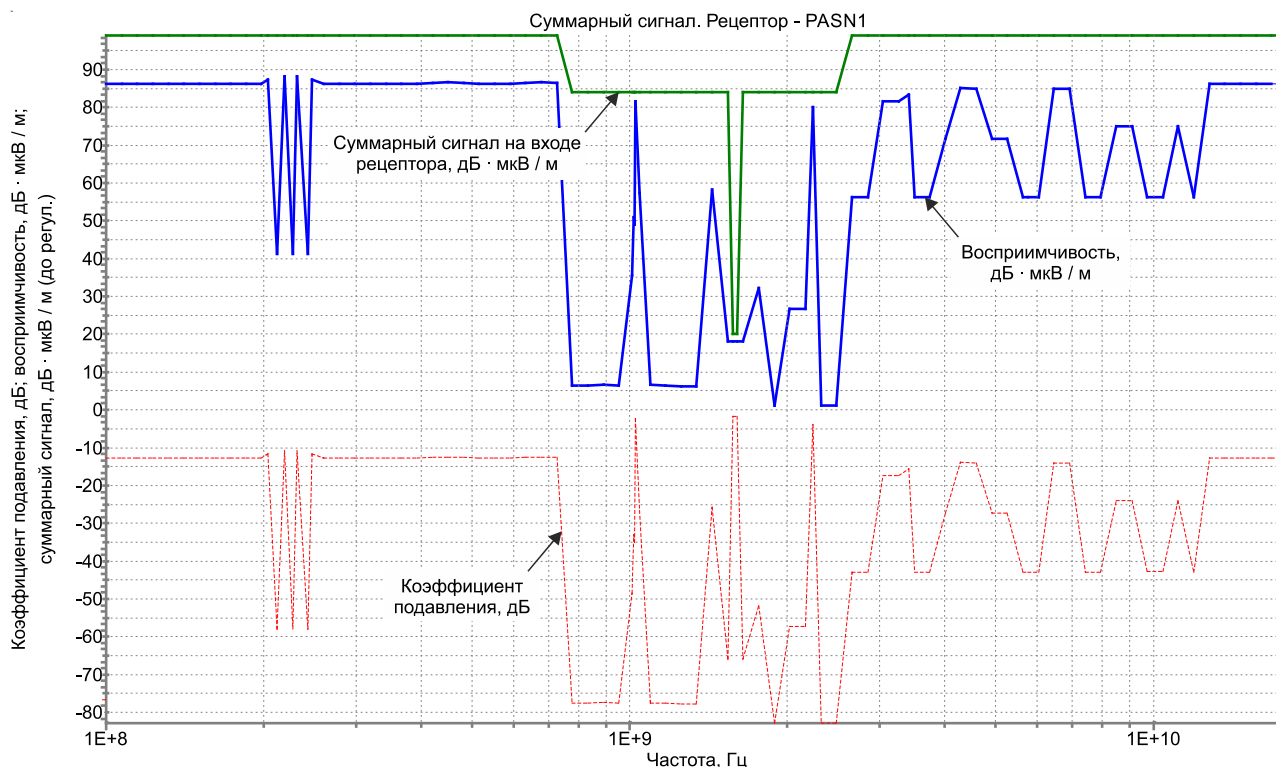


Рис. 11

5. В антенно-фидерный тракт передатчика включен фильтр с ослаблением -40 дБ в полосе $1.5...1.7$ ГГц.

6. В антенно-фидерный тракт приемника включен фильтр с ослаблением -15 дБ в полосе $1.1...1.25$ ГГц.

Расчет возможности обеспечения помехозащищенности радиотехнических систем на борту космического аппарата с учетом рекомендуемых мер представлен на рис. 10 и 11.

Таким образом:

1. Оценка помех, создаваемых суммарным электромагнитным сигналом приемнику порта PASN1 показала, что максимальный коэффициент подавления равен $-1,8$ дБ в рабочей полосе частот приемника. Помехозащищенность обеспечивается.

2. Оценка помех, создаваемых суммарным электромагнитным сигналом приемнику порта

PAUSN1 показала, что максимальный коэффициент подавления равен $-1,6$ дБ в рабочей полосе частот приемника НАП. Помехозащищенность обеспечивается.

Список литературы

1. Дементьев А.Н., Нефедов В.И., Филатов А.А. Электромагнитная совместимость и помехозащищенность систем спутниковой связи с орбитальными и внутрисистемными источниками радиопомех // Сборник трудов ОАО «Концерн радиостроения «Вега». 2016. № 4. С. 45–49.
2. Помехозащищенность систем спутниковой связи и навигации с многолучевыми активными фазированными антенными решетками / А.Н. Дементьев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 6–12.
3. Анализ методов оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств ракеты-носителя тяжелого класса типа «Ангара-А5» / А.Н. Дементьев [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 3 (88). С. 21–27.

Mathematical modeling of the electromagnetic environment on board the spacecraft

A.N. Dementyev

The mathematical model of the electromagnetic interaction of the technical means of the space complex is a mathematical analogue of the real process, passing under the influence of external influencing environmental factors. The task of adapting mathematical models of a spacecraft to a real electromagnetic environment on board and ensuring the choice of the minimum necessary and sufficient circuit solutions to ensure the noise immunity of radio electronic means becomes urgent.

Keywords: noise immunity, mathematical modeling, receiver sensitivity, satellite communication systems.