
УДК 621.391.2

Имитационное моделирование электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей

Важенин Н. А.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
Россия*

e-mail: riame@sokol.ru

Аннотация

Рассматривается имитационное моделирование нетеплового излучения стационарных плазменных двигателей, которое представляет собой помеху для канала «Земля-КА» систем космической связи. Проводится сравнительный анализ статистических характеристик сигналов, полученных экспериментально, с соответствующими характеристиками имитационных моделей таких сигналов. Полученные результаты могут быть использованы при анализе помехоустойчивости различных алгоритмов приема сигналов в системах космической связи, функционирующих при воздействии данного вида помех.

Ключевые слова: космическая связь, импульсные помехи, стационарные плазменные двигатели, математические и имитационные модели

Введение

С точки зрения математического описания собственного электромагнитного излучения электрических ракетных двигателей (ЭРД) возможны два основных подхода: электродинамический и феноменологический [1], [2].

Электродинамический подход основывается на разработке математических моделей процессов генерации плазменного электромагнитного

излучения, базирующихся на фундаментальных законах плазменной электродинамики.

Феноменологический подход, не углубляясь в тонкую физическую природу генерации электромагнитного излучения плазмы, базируясь в основном на результатах экспериментальных исследований, формирует некоторые эквивалентные математические модели такого излучения, удобные с точки зрения использования в инженерной практике.

Упомянутые два подхода не противоречат, а эффективно дополняют друг друга. Электродинамические модели чрезвычайно важны с точки зрения понимания физической природы и закономерностей формирования электромагнитного излучения плазмы, но, как правило, являются весьма сложными для использования при проектировании бортовых систем КА.

В то же время феноменологические модели, не претендуя на детальное раскрытие физических механизмов формирования излучения плазмы, позволяют эффективно решать конкретные инженерные задачи проектирования бортовых радиосистем КА - такие, например, как оценка электромагнитной совместимости ЭРД и бортовых радиосистем, оценка помехоустойчивости, дальности действия, скорости передачи информации в условиях функционирования ЭРД и т.п. Разработка феноменологических моделей, как правило, осуществляется как на основе результатов экспериментальных исследований, так и с использованием данных, полученных в рамках электродинамического подхода.

Анализ результатов экспериментальных исследований собственного электромагнитного излучения ЭРД показал, что излучение ЭРД кроме тепловой компоненты содержит широкополосный импульсный случайный процесс, спектральная плотность которого лежит в пределах от десятков Гц до единиц или десятков ГГц [3], [4], [5].

Ниже в рамках феноменологического подхода рассматриваются математические модели собственного электромагнитного излучения

стационарных плазменных двигателей КА. Данный тип ЭРД получил широкое распространение и используется на многих функционирующих КА, а также планируется к использованию на перспективных КА. Конечной целью создания таких моделей излучения ЭРД является разработка математических и имитационных моделей, которые могли бы найти применение в задачах аналитического проектирования и имитационного моделирования радиосистем космической связи.

2. Математическое описание нетеплового излучения СПД

Экспериментальные исследования характеристик излучения одного из видов ЭРД - стационарных плазменных двигателей (СПД) [3] показали что, во временной области это излучение имеет ярко выраженный импульсный характер и не может быть описано с помощью традиционных моделей аддитивного белого гауссова шума (АБГШ). Примеры реализаций амплитудных огибающих излучения лабораторного макета ЭРД СПД-100-2, полученных для различных частотных диапазонов и полосы анализа 80 МГц, приведены на рисунке 1.

Измерения статистических характеристик излучения ЭРД во временной области проводились для различных типов СПД, как в «панорамном» режиме

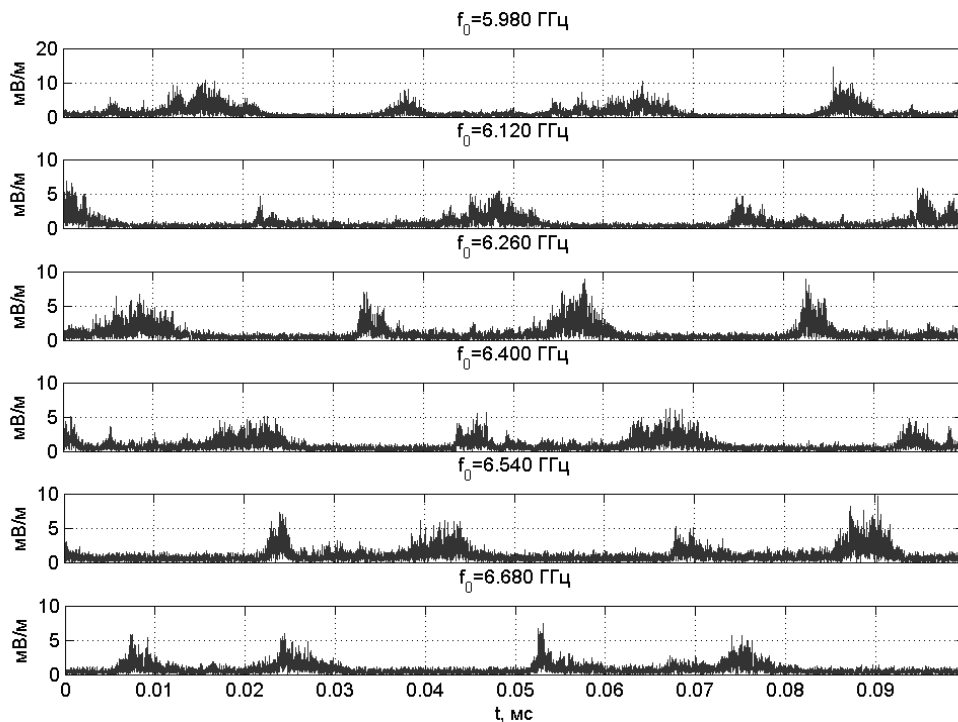


Рисунок 1 - Пример амплитудной огибающей излучения лабораторного макета СПД-100-2

от 0.1 ГГц до 18 ГГц с шагом 80 или 140 МГц, так и для основных частотных диапазонов каналов Земля-КА систем космической связи: в S-диапазоне 2.072-2.1 ГГц и 2.55-2.6 ГГц, в C-диапазоне 5.9-6.4 ГГц, в X-диапазоне 7.145-7.235 ГГц. Аналитические математические модели и статистические характеристики излучения СПД рассмотрены, например, в [1-5].

В работах по исследованию влияния аддитивных импульсных помех на системы передачи информации импульсная помеха (ИП) преимущественно моделируется как случайный процесс $z(t)$ с определенными статистическими характеристиками. Такую ИП называют случайной или хаотической. Одномерная плотность вероятности $w(z)$ этого процесса, в отличие от плотности вероятности широкополосных шумовых помех, в общем случае является принципиально негауссовой. С точки зрения последующего расчета вероятности ошибочного приема символа наибольший интерес представляет

закон распределения мгновенных значений амплитудной огибающей импульсной помехи.

Действительный узкополосный процесс $z(t)$ можно описать, используя его комплексное представление $\dot{z}(t)$

$$z(t) = \operatorname{Re} \dot{z}(t), \quad (1)$$

где $\dot{z}(t) = z(t) + j\tilde{z}(t) = \dot{Z}(t) \exp(j\omega_0 t)$, $\tilde{z}(t)$ - преобразование Гильберта от процесса $z(t)$, $\dot{Z}(t) = |\dot{Z}(t)| \exp(-j\varphi(t)) = I(t) + jQ(t)$ - комплексная огибающая сигнала, $|\dot{Z}(t)|$ - амплитудная огибающая, $\varphi(t) = \operatorname{arctg}(Q(t)/I(t))$ - фаза комплексной огибающей, ω_0 - центральная частота.

Процессы $z(t)$ и $\tilde{z}(t)$ имеют смысл синфазной и квадратурной компонент узкополосного сигнала, а $I(t) = |\dot{Z}(t)| \cos \varphi(t)$ и $Q(t) = |\dot{Z}(t)| \sin \varphi(t)$ - синфазной и квадратурной компонент комплексной огибающей сигнала $\dot{Z}(t)$. При этом можно показать, что

$$z(t) = I(t) \cos \omega_0 t + Q(t) \sin \omega_0 t = |\dot{Z}(t)| \cos(\omega_0 t - \varphi(t)), \quad (2)$$

$$\tilde{z}(t) = I(t) \sin \omega_0 t - Q(t) \cos \omega_0 t = |\dot{Z}(t)| \sin(\omega_0 t - \varphi(t)). \quad (3)$$

Для математического описания импульсных помех обычно используют следующие характеристики [1]:

- экспериментально полученные временные реализации квадратурных компонент $I(t)$, $Q(t)$ и их математическое описание;
- дифференциальный закон распределения (ДЗР) квадратурных компонент $I(t)$ и $Q(t)$;
- ДЗР амплитудной огибающей $\sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$;
- ДЗР мощностной огибающей $I^2(t) + Q^2(t)$;
- ДЗР фазы $\operatorname{arctg}(Q(t)/I(t))$;
- интегральный закон распределения (ИЗР) огибающей помехи;
- ДЗР пересечения амплитудной огибающей заданного уровня;
- автокорреляционная функция временных реализаций помехи;

- спектральная плотность мощности (СПМ) (энергетический спектр) помехи;

- ДЗР длительности импульсов;

- ДЗР интервала следования импульсов.

В зависимости от конкретных решаемых задач может использоваться некоторый набор из вышеперечисленных параметров.

3. Компьютерное моделирование радиоизлучения СПД

Ввиду значительных математических сложностей, связанных с адекватным описанием ИП от СПД, а также с использованием аналитических методов исследования помехоустойчивости различных алгоритмов приема, большой практический и теоретический интерес представляет разработка имитационных компьютерных моделей ИП от СПД.

В известных работах, посвященных компьютерному моделированию ИП, например, [6], [7], [8] и др. описываются компьютерные модели атмосферных ИП, помех в DSL линиях, каналах связи, использующих высоковольтные линии передач, ИП в радиолокационных каналах и т.п. Эти модели опираются на рассмотренные в [1], [2] статистические модели ИП и соответствующие результаты экспериментальных измерений, адаптированы к конкретным типам систем передачи данных или локации. В связи с этим прямое использование полученных в данных работах результатов в другой предметной области практически невозможно. В то же время существует ряд методологических принципов, общих для формирования компьютерных моделей ИП, которые следует учитывать.

Для имитационного моделирования импульсного электромагнитного излучения ЭРД был разработан специализированный программный комплекс в среде MATLAB/Simulink, позволяющий генерировать случайную последовательность комплексных импульсных сигналов, обладающую заданными статистическими характеристиками.

Программный комплекс, формирующий случайную последовательность комплексных импульсных функций, которые моделируют случайную ИП, реализован в виде блока Генератор СИП (Случайной Импульсной Помехи). Пример головной модели, предназначенной для тестирования данного блока, приведен на рисунке 2. При проведении тестовых испытаний генератора ИП снимались и анализировались эпюры сигналов на выходе и в различных внутренних точках генератора, оценивались параметры импульсной последовательности и законы распределения амплитудных и фазовых характеристик ИП.

Алгоритм функционирования блока Генератор СИП соответствует ряду математических моделей ИП, описанных в [2]. Рассматриваемый блок включает в себя следующие блоки (рисунок 3): Генератор запускающих импульсов 1 – генерирует случайную последовательность коротких прямоугольных импульсов, Формирователь случайной последовательности импульсов 2 – формирует заданную огибающую каждого импульса, 3 – Сумматор, 4 - выходной порт подпрограммы. Блок Генератор запускающих импульсов 1 представляет собой генератор случайной последовательности коротких прямоугольных импульсов единичной амплитуды и длительности Δt , следующих со случайным интервалом T_{pi}

$$u_e(t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_1\left(t - \sum_{l=1}^i T_{pl}\right), \quad (4)$$

где $u_1(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, \Delta t), \\ 0, & t \notin [0, \Delta t), \end{cases}$ - элементарный импульс единичной амплитуды и

длительности Δt .

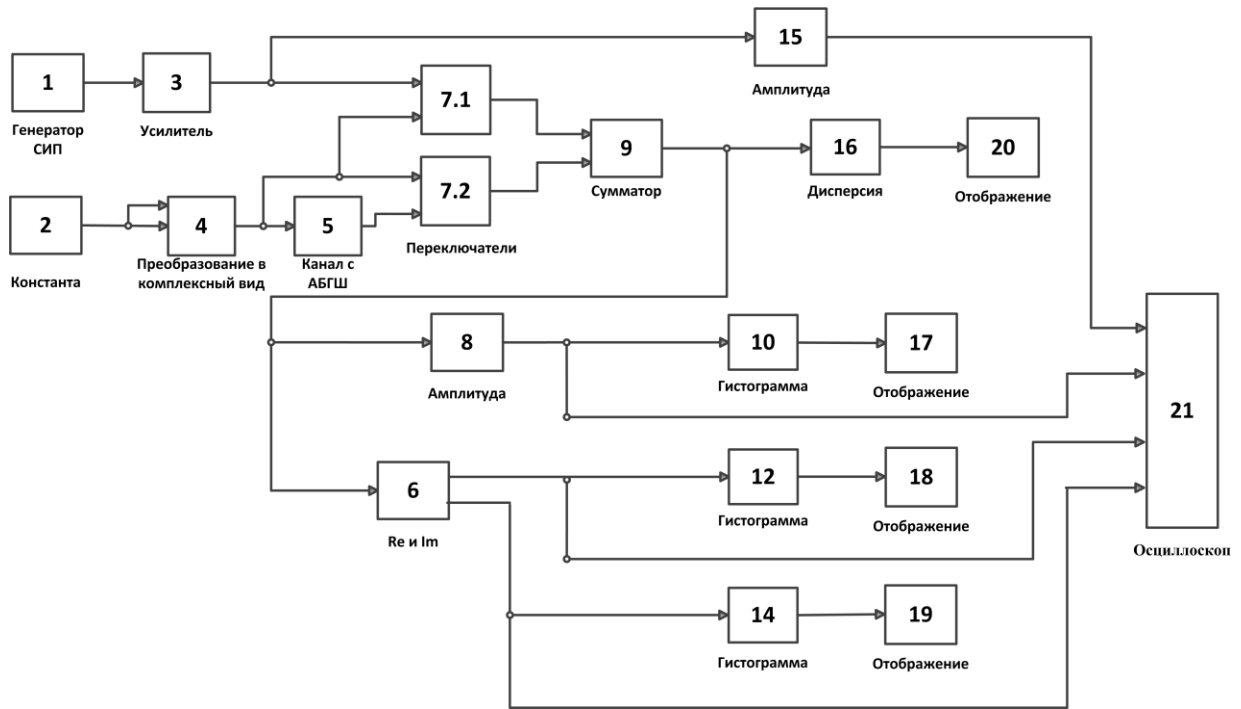


Рисунок 2

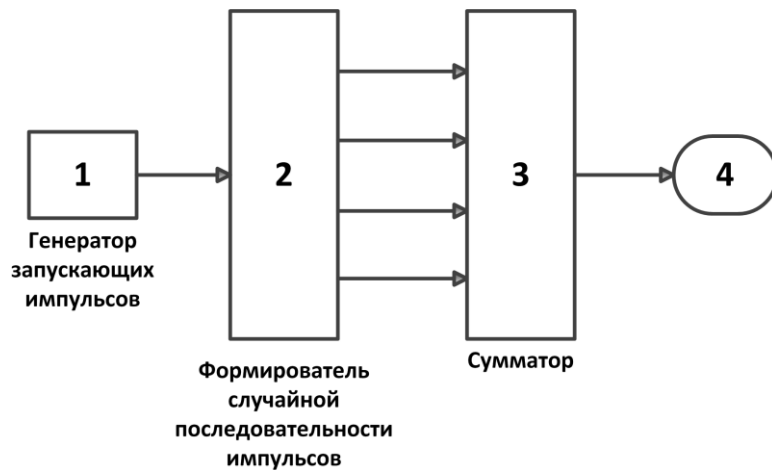


Рисунок 3

Имеется возможность моделировать случайную последовательность импульсов с равномерным, гауссовским и пуассоновским законами распределения интервалов следования T_{pi} . В принципе возможна реализация и любого другого требуемого закона распределения.

Блок-схема Генератора запускающих импульсов 1 приведена на рисунке 4. Данный блок содержит две части: первая, включающая блоки 1, 2, 4, 5, 8, 9, 11, обеспечивает формирование последовательности коротких импульсов, следующих друг за другом со случайным интервалом. Закон распределения интервала следования импульсов может быть равномерным на заданном интервале, гауссовым или пуассоновским - по выбору пользователя. Случайное значение данного интервала формируется второй частью схемы (блоки 3, 6, 7, 10, 12), функционирующей с шагом $\max\{SampleTime, T_{min}\}$, где $SampleTime$ – шаг продвижения модельного времени, T_{min} – некоторый временной интервал, выбираемый пользователем для сокращения общего времени моделирования и, как правило, больший $SampleTime$, но меньший среднего периода следования импульсов ИП.

Блок-схема Формирователя случайной последовательности импульсов, обеспечивающего формирование последовательности импульсов с заданной огибающей и следующих со случайным интервалом, имеющим заданный закон распределения, приведена на рисунке 5. Формирователь содержит 4 канала формирования одиночных импульсов ИП, что обеспечивает моделирование последовательности импульсов, имеющей до 4-х кратного перекрытия областей расчета каждого импульса. На практике этого достаточно для моделирования случайной последовательности импульсов с коэффициентом перекрытия от 1 до 4, в зависимости от формы импульса помехи. Данный формирователь может генерировать случайную последовательность импульсов произвольной заданной формы, которая реализуется блоками 11-14 Генератора одиночного импульса (рисунок 6). Данный генератор запускается проходящими прямоугольными импульсами единичной амплитуды $u_e(t)$ и считывает из Рабочей области заранее рассчитанный массив значений функции, описывающий форму амплитудной огибающей каждого импульса

$$u_{op}(t) = u_e(t) \otimes u_o(t), \quad (5)$$

где $u_o(t)$ - импульсная характеристика формирующего фильтра, совпадающая в данном случае с формой огибающей импульса помехи, \otimes - оператор свертки.

Разработанная модель позволяет формировать последовательности следующих импульсов:

- прямоугольный импульс,
- треугольный импульс,
- гауссов импульс,

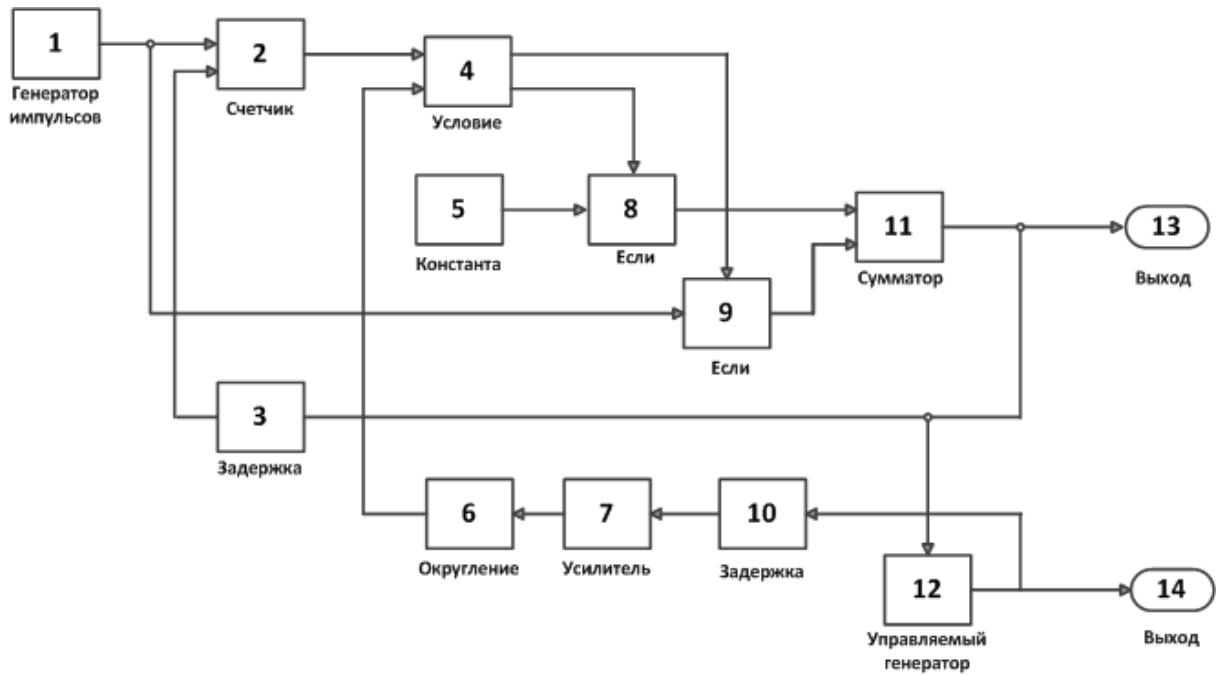


Рисунок 4

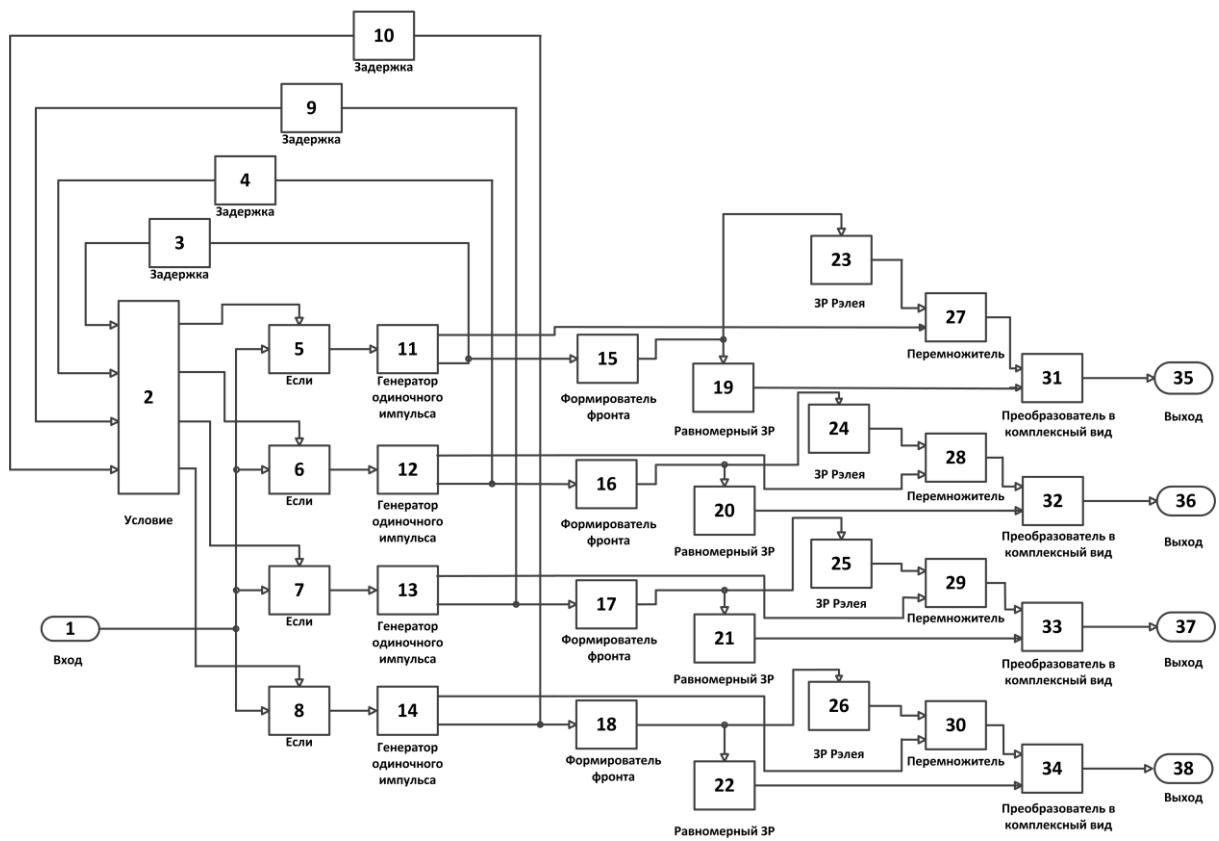


Рисунок 5

шумоподобный импульс с заданным законом распределения (ЗР). Дополнительно могут быть реализованы и другие формы импульсов помехи.

В Формирователе случайной последовательности импульсов осуществляется текущий контроль занятости каждого из четырех каналов, и входной запускающий импульс поступает только на вход свободного канала. Таким образом обеспечивается возможность моделирования перекрытия до 4-х соседних импульсов, что на практике является вполне достаточным. Данное ограничение при необходимости может быть достаточно легко преодолено путем модернизации модели. На выходе формируется комплексный импульсный сигнал заданной формы максимальное амплитудное значение которого распределено по закону Рэлея, а фаза – по равномерному закону. Суммарный помеховый сигнал $n_{\Sigma}(t)$ представляет собой сумму импульсной помехи $u_p(t)$ и белого гауссова шума $n(t)$

$$n_{\Sigma}(t) = u_p(t) + n(t). \quad (6)$$

Или в комплексной форме

$$\dot{n}_{\Sigma}(t) = \dot{u}_p(t) + \dot{n}(t) = (\dot{U}_p(t) + \dot{N}(t)) \exp(j\omega_0 t), \quad (7)$$

где ω_0 - центральная частота спектра, $\dot{U}_p(t) = U_{op}(t) \exp(j\varphi_{op}(t))$ - комплексная огибающая импульсной помехи, $U_{op}(t)$ - амплитудная огибающая импульсной помехи, $\varphi_{op}(t)$ - суммарная фазовая характеристика ИП.

Таким образом, комплексная огибающая импульсной помехи может быть представлена в виде

$$\dot{U}_p(t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_o(t - \sum_{l=1}^i T_{pi}) \exp(-j(\varphi_{oi} + \varphi_{opi}(t))), \quad (8)$$

где φ_{oi} - случайный фазовый сдвиг для каждого импульса помехи, равномерно распределенный от 0 до 2π , $\varphi_{opi}(t)$ - закон изменения фазы в пределах i -го импульса помехи, который может учитывать следующие эффекты:

- случайное изменение частоты от импульса к импульсу,
- случайное изменение фазы в пределах каждого импульса,
- детерминированное изменение фазы в пределах каждого импульса,
- и т.п.

На рисунках 7 и 8 приведены примеры эюр случайной последовательности импульсов с гауссовой огибающей для двух масштабов отображения времени наблюдения

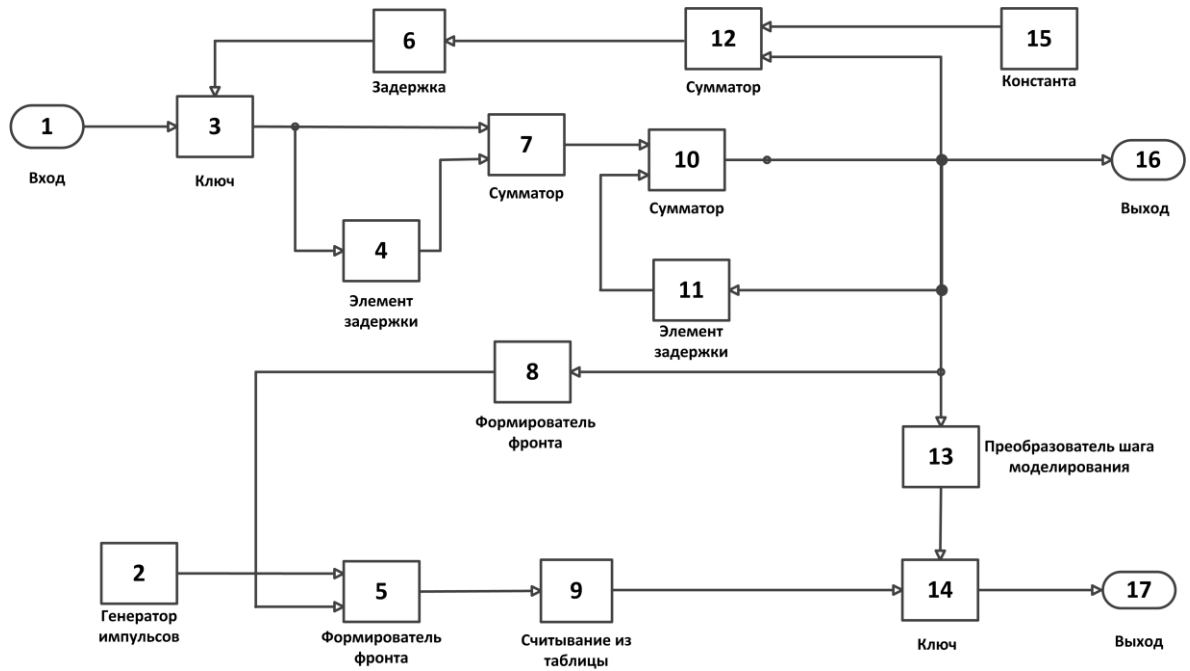


Рисунок 6

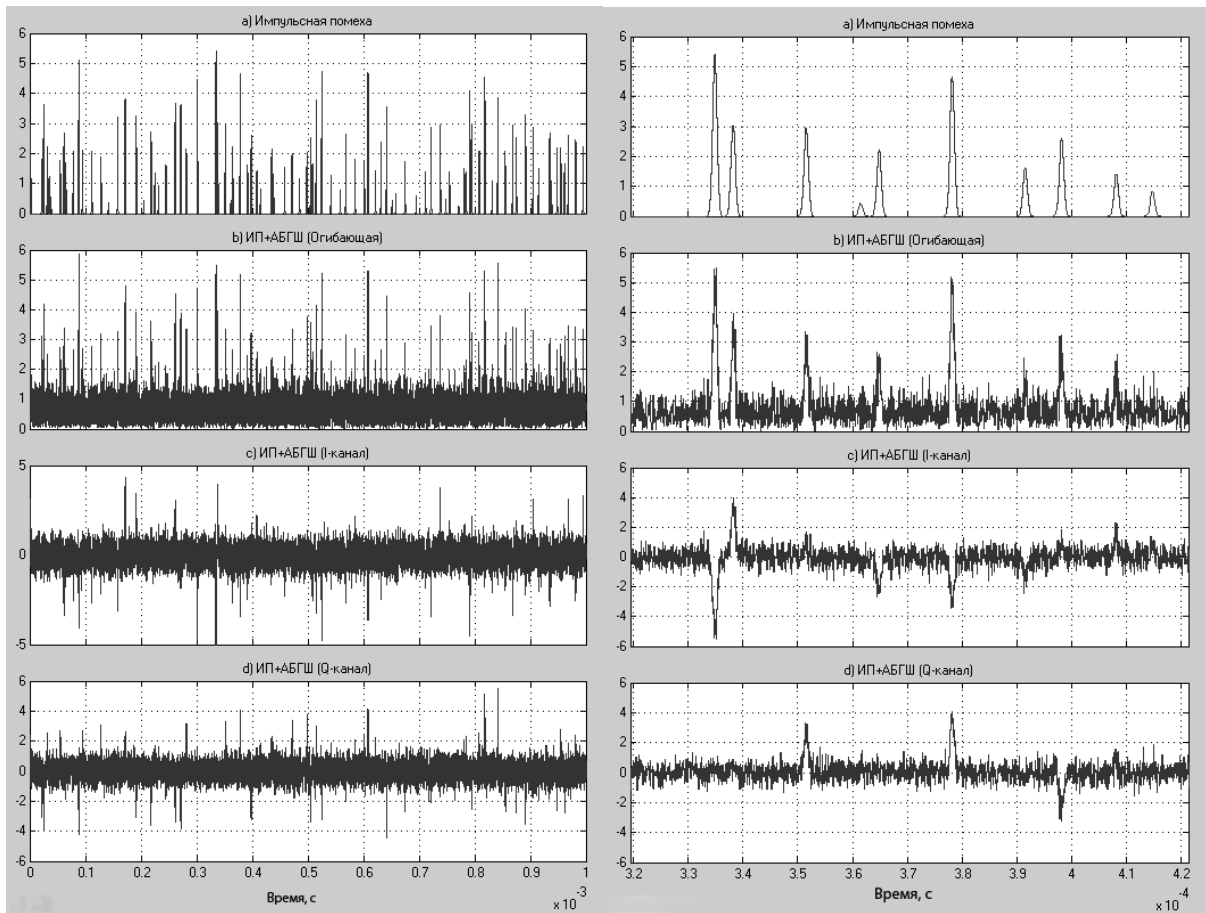


Рисунок 7

Рисунок 8

соответственно. По вертикали на графиках отражены следующие зависимости: а) – огибающая импульсной помехи; б) – огибающая смеси ИП и АБГШ; в) – действительная компонента комплексной амплитуды смеси ИП и АБГШ, d) – мнимая компонента комплексной амплитуды смеси ИП и АБГШ. Данные результаты получены для средней длительности импульса помехи 1.0 мкс, средней скважности следования импульсов помехи равной 10, шага моделирования 100 нс, гауссовой формы каждого импульса и пуассоновского закона распределения интервала между импульсами.

Пример сравнения ДЗР и ИЗР компьютерной модели ИП с аналогичными ЗР, полученными по экспериментальным данным, приведен на рисунках 9 и 10. Видно, что в целом имитационная модель смеси ИП и АБГШ обеспечивает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными результатами и может быть использована при оценке помехоустойчивости систем передачи информации, функционирующих в условиях воздействия таких помех. Точность имитационной модели помехи может быть увеличена путем более точного задания параметров модели, в частности, формы огибающей импульсов применительно к конкретному типу ЭРД - источнику помехи.

Таким образом, разработанный программный комплекс на основе метода комплексной огибающей позволяет осуществлять генерацию случайной последовательности радиоимпульсов, имеющих заданный закон распределения амплитудных характеристик, интервалов следования, заданную форму огибающей, длительность и частоту заполнения каждого импульса.

4. Заключение

Для разработки математических моделей и описания статистических характеристик излучения ЭРД в основном используются два подхода: представление данного процесса в виде эквивалентного аддитивного белого гауссового шума на входе приемника, а также представление его в виде аддитивной смеси АБГШ и эквивалентного случайного импульсного процесса.

Первый подход достаточно хорошо отработан и позволяет относительно просто получать количественные оценки влияния излучения ЭРД на характеристики помехоустойчивости систем связи, однако не в полной мере отвечает требованиям точности описания процессов на входе приемного устройства.

Второй подход более адекватно описывает временную структуру сигналов, но требует дальнейшего углубленного изучения и детализации, как в плане экспериментального определения статистических характеристик и параметров случайной импульсной последовательности, так и в плане анализа влияния такой помехи на помехоустойчивость конкретных алгоритмов демодуляции и декодирования, используемых в современных и перспективных системах космической связи.

Разработанные имитационные модели излучения ЭРД показали хорошее совпадение с характеристиками излучения ЭРД, полученными экспериментально, и могут быть использованы при моделировании и прототипировании цифровых алгоритмов обработки сигналов в системах космической связи.

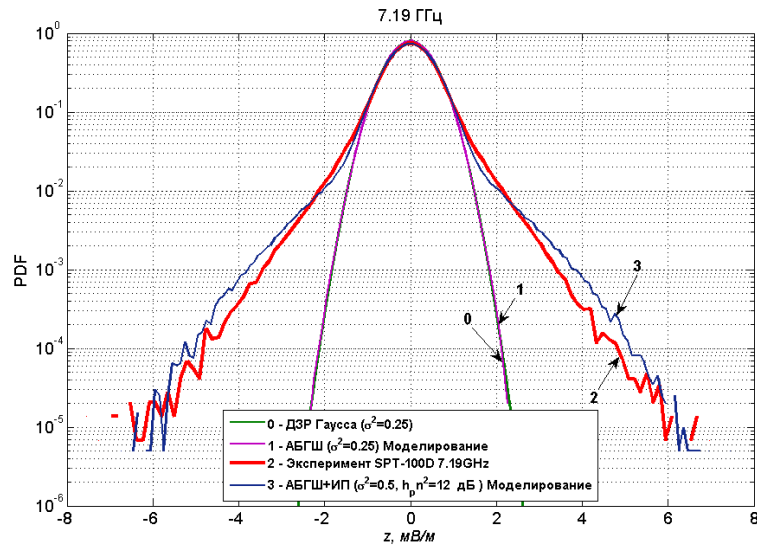


Рисунок 9

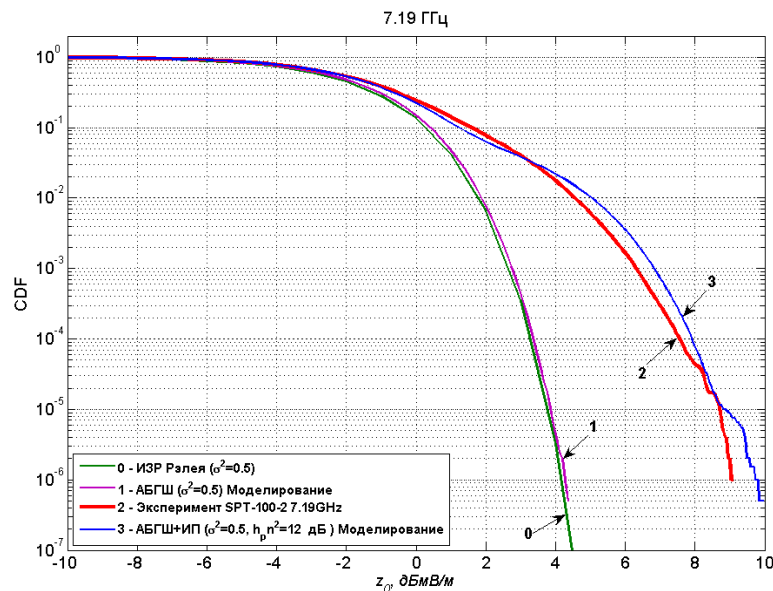


Рисунок 10

Библиографический список

1. Важенин Н.А. Эмпирические модели законов распределения импульсных помех от стационарных плазменных двигателей. Электронный журнал "Труды МАИ", 2012, № 59, 15 стр. ISSN: 1727-6942. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35248>

2. Важенин Н.А. Феноменологические модели импульсных помех от стационарных плазменных двигателей. Электронный журнал "Труды МАИ", 2013, № 66, 26 стр. ISSN: 1727-6942. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40277>
3. Важенин Н.А., Плохих А.П. Статистические характеристики помех стационарных плазменных двигателей // Тез. докл. "VIII Международного симпозиума по радиационной плазмодинамике РПД-2009", Москва, 8 - 11 декабря 2009 г., с. 24-28.
4. Важенин Н.А., Плохих А.П. Имитационное моделирование радиопомех, создаваемых стационарными плазменными двигателями. IX Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов. - М.: НИЦ "Инженер", 2012, с. 107-111.
5. Plokhikh A.P., Vazhenin N. F., Kim V., Sidorenko E., Soganova G.V. Study for the Influence of Stationary Plasma Thruster Operating Modes on its Electromagnetic Emission. The 32nd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2011-094), Wiesbaden, Germany. 2011, pp.256-258, (695p.).
6. Nedko H. Nedev. Analysis of the Impact of Impulse Noise in Digital Subscriber Line Systems. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Edinburgh. March 2003.
7. Ljiljana Milić and Jovanka Gajica. A computer model of the impulse noise produced by operation of breakers and switches in power electric system. 18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2010). Aalborg, Denmark, August 23-27, 2010.
8. Rangaswamy R., Weiner D., Öztürk A. Computer Generation of Correlated Non-Gaussian Radar Clutter. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 31, No 1, January 1995, p. 106-116.