

УДК 621.396.94

Эмпирические модели законов распределения импульсных помех от стационарных плазменных двигателей

Н.А. Важенин

Аннотация

Экспериментальные исследования статистических характеристик собственного электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей холловского типа показали, что данное излучение может носить ярко выраженный нетепловой (импульсный) характер и представляет собой помеху для бортовых радиосистем КА. В данной работе систематизируются и анализируются математические модели, применимые для описания законов распределения такого излучения, знание которых необходимо для оценки помехоустойчивости радиосистем связи КА.

Ключевые слова: космическая связь; импульсные помехи; стационарные плазменные двигатели; математические модели

1. Введение

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

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 тоже 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.

Феноменологические модели собственного электромагнитного излучения ЭРД могут иметь различный уровень детализации. В данной работе рассматриваются простейшие модели, описывающие различные законы распределения, которые могут быть использованы для аппроксимации экспериментальных результатов. Конечной целью создания таких моделей является разработка математических и имитационных моделей излучения ЭРД, которые могли бы найти применение в задачах аналитического проектирования и имитационного моделирования радиосистем космической связи.

2. Математическое описание нетеплового излучения ЭРД

Экспериментальные исследования характеристик излучения одного из видов ЭРД - стационарных плазменных двигателей (СПД) [1] 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

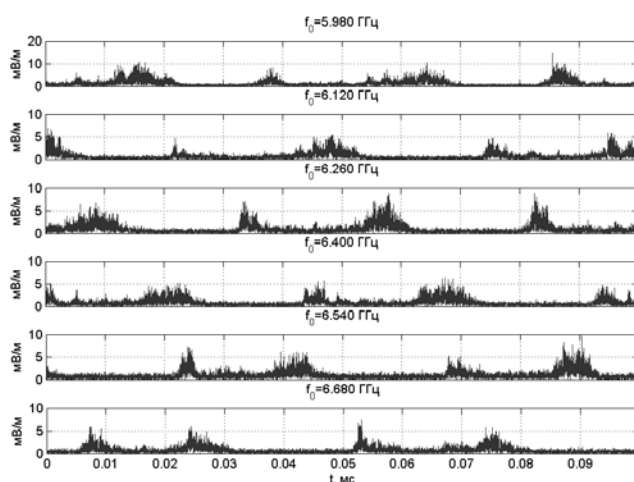


Рисунок 1 - Пример амплитудной огибающей излучения лабораторного макета СПД-100-2

реализаций амплитудных огибающих излучения лабораторного макета электрического ракетного двигателя (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 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.

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 [1]. 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 $\dot{z}(t)$

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

где $\dot{z}(t) = z(t) + j\tilde{z}(t) = \dot{Z}(t)\exp(j\omega_0 t)$, $\tilde{z}(t)$ - преобразование Гильберта 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, $\varphi(t) = \arctg(Q(t)/I(t))$ - фаза комплексной огибающей.

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:

- экспериментально полученные временные реализации квадратурных компонент $I(t)$, $Q(t)$ и их математическое описание;
- дифференциальный закон распределения (ДЗР) или интегральный закон распределения (ИЗР) 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 $\arctg(Q(t)/I(t))$;
- 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 выше перечисленных параметров.

Рассмотрим основные разновидности математических моделей законов распределения импульсных помех различной физической природы, опираясь на их классификацию, приведенную в [2], и оценим их применимость для описания нетеплового излучения СПД. В дальнейшем будут рассмотрены более подробные феноменологические модели и проведено их сравнение с результатами экспериментальных измерений излучения СПД.

3. Эмпирические модели законов распределения импульсных помех

Данный класс моделей не рассматривает внутренние механизмы формирования импульсных помех, а ограничивается в основном описанием их статистических характеристик и используется в основном для аппроксимации экспериментальных результатов.

Большинство эмпирических моделей ограничиваются описанием дифференциального $w(|\dot{Z}|)$ или интегрального $W(|\dot{Z}| > z_0)$ закона распределения огибающей импульсной помехи.

Модель Хесперпера, Кесслера, Суливана и Уеллза (Hesperper, Kessler, Sullivan and Wells)

Данная модель предполагает логонормальный закон распределения огибающей импульсной помехи [3]

$$w(|\dot{Z}|) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\mu}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log|\dot{Z}| - \log\mu}{\sigma}\right)^2\right). \quad (4)$$

Недостатком данной модели является плохое согласование с Рэлеевским (Rayleigh) законом распределения (ЗР) при малом уровне ИП.

Модель Лихтера

Здесь ЗР импульсной помехи аппроксимируется взвешенной суммой двух Рэлеевских ЗР [4]:

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = (1 - c) \exp(-az_0^2) + c \exp(-bz_0^2). \quad (5)$$

Модель Уатта (Watt)

Данная модель представляет собой модификацию Рэлеевского ЗР [3]:

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = \exp(-x_0^2), \quad (6)$$

где

$$x_0 = a_1 z_0 + a_2 z_0^{(b+1)/2} + a_3 z_0^b,$$

$$b = 0.6 \left[20 \log \frac{\sigma_{|\dot{Z}|}}{|\dot{Z}|} \right]. \quad (7)$$

и обеспечивает лучшее, по сравнению с рассмотренными выше моделями, соответствие ряду экспериментальных данных при больших и малых значениях вероятностей.

Модель Ишида (Ishida)

Представляет собой комбинацию Рэлеевского и логонормального законов распределения [5]

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = (1 - c) \exp(-az_0^2) + c \cdot \text{lognormal distribution}. \quad (8)$$

Модель Хорнера и Харвуда (Horner and Harwood)

Представляет интегральный ЗР огибающей импульсной помехи в виде [6]

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = \frac{\gamma}{z_0^q + \gamma^2}. \quad (9)$$

Модель Кричлоу (Crichlow)

Предлагает использовать ЗР Рэля для случая малого уровня ИП и "мощный" ЗР Рэля [7]

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = \exp\left(-\left(a z_0^2\right)^{1/s}\right), \quad (10)$$

для большого уровня помех. Данная модель показала хорошее совпадение с рядом экспериментальных данных для широкого диапазона уровней ИП и долгое время была стандартом для описания атмосферных радишумов.

Обобщенная гиперболическая модель Мертва (Mertz)

В соответствии с данной моделью ЗР импульсных помех описывается гиперболической функцией m -го порядка [8], [9]:

$$w(|\dot{Z}|) = \frac{mh^m}{(|\dot{Z}| + h)^{m+1}}, \quad (11)$$

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = \frac{h^m}{(z_0 + h)^m}, \quad (12)$$

где $m=3, 4, 5\dots$ - порядок гиперболической функции, h - константа, во многих случаях может быть принята равной единице.

Для данного ЗР математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) процесса определяются соотношениями:

$$\overline{|\dot{Z}|} = \frac{h}{m-1}, \quad (13)$$

$$\sigma_{|\dot{Z}|} = h \sqrt{\frac{2}{(m-1)(m-2)}}. \quad (14)$$

Модель Энджела (Engel)

Может рассматриваться, как частный случай модели Мертва [10]:

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = \left(\frac{k_0}{z_0}\right)^{2\alpha}. \quad (15)$$

Данная модель показала хорошее соответствие характеристикам ИП в телефонных линиях.

Модель Кнеуэра (Kneuer)

Дифференциальный ЗР огибающей описывается соотношением [11]:

$$w(|\dot{Z}|) = \frac{C}{|\dot{Z}|^{\frac{2}{q}+1}}, \quad (16)$$

при этом q может принимать значения от 0.5 до 1.

Модель Галейса (Galejs)

Представляет собой сумму двух экспоненциальных ЗР [12]

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = (1 - \delta) \exp(-\alpha_1 z_0) + \delta \exp(-\alpha_2 z_0), \quad (17)$$

и дает хорошую аппроксимацию ЗР атмосферных ИП на основе подбора параметров $\delta, \alpha_1, \alpha_2$. В [13] приводится более сложное соотношения, описывающее ЗР ИП:

$$W(|\dot{Z}| > z_0) = \left(1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 - \left(\frac{d}{a}\right)^2\right)^{-\left(\frac{z_0}{\sigma}\right)^2} + \frac{b^2}{(z_0^2 + a^2) + z_0(z_0^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} + \left(\frac{d}{a}\right)^2 \exp(-sz_0), \quad (18)$$

Модель Накаи и Нагатани (Nakai and Nagatani)

Предполагает использование кусочной аппроксимации ЗР на основе двух логонормальных ЗР [14]:

$$w(|\dot{Z}|) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\log|\dot{Z}| - \log \mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right), \quad B < |\dot{Z}| < \infty, \quad (19)$$

$$w(|\dot{Z}|) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\log|\dot{Z}| - \log \mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right), \quad 0 < |\dot{Z}| < B.$$

Примеры некоторых ДЗР и ИЗР огибающей ИП приведены на рисунках 2 и 3. Видно, что данные законы распределения существенно отличаются от рэлеевского закона распределения.

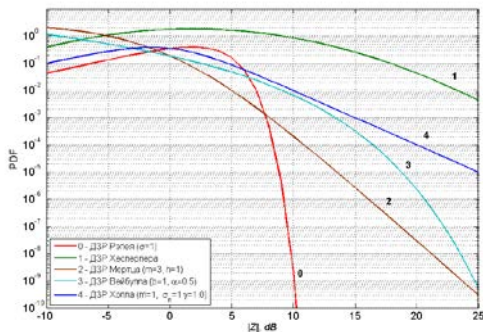


Рисунок 2

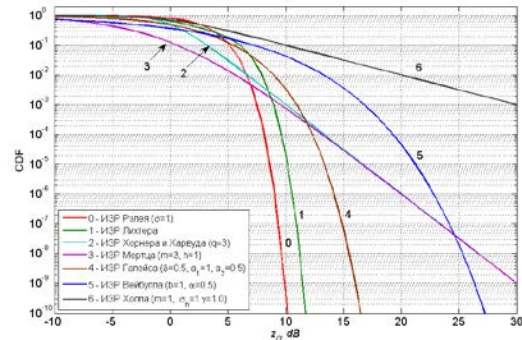


Рисунок 3

Модель Гильберта-Поллака (Gilbert, Pollak)

В [15-17] рассматривается модель ИП, основанная на модификации нормального ЗР мгновенных отсчетов сигнала

$$w(z) = \frac{\nu}{2\sqrt{2} \Gamma\left(\frac{1}{\nu}\right) \sigma} \exp\left\{-\frac{|z|^\nu}{2^{\frac{\nu}{2}} \sigma^\nu}\right\}, \quad -\infty < z < \infty. \quad (20)$$

Здесь $\sigma \geq 0$; $\Gamma(\bullet)$ – гамма-функция. При $\frac{1}{2} < \nu < 1$ данная модель хорошо аппроксимирует некоторые атмосферные шумы, а при $1 \leq \nu \leq 2$ ИП типа ударного

возбуждения контура. Графики функции (20) для различных значений параметра ν приведены на рисунке 4

Закон распределения Лапласа (Laplas)

Данный класс моделей использует сигнал дискретизированный во времени и ИП представляется в виде дискретного аддитивного белого лапласовского шума n_i , имеющего ДЗР вида [18], [19], [20]

$$w(n) = \frac{\gamma}{2} \exp(-\gamma|n|). \quad (21)$$

В [19] показано, что, если в (7) положить $m = h/\gamma - 1$, то при $h \rightarrow \infty$ ЗР Мертца становится подобным ЗР Лапласа.

Вид закона распределения Лапласа для различных значений параметра γ приведен на рисунке 5.

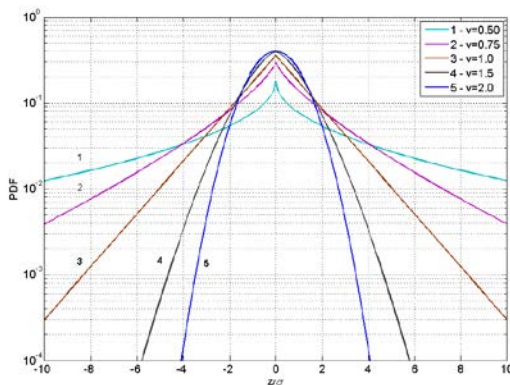


Рисунок 4

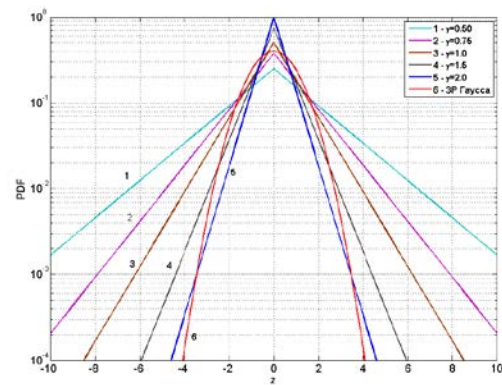


Рисунок 5

Модель Хенкеля и Кесслера (Henkel and Kessler)

Как показали результаты экспериментальных исследований, во многих случаях ДЗР ИП в xDSL-линиях можно аппроксимировать с помощью растянутого экспоненциального закона распределения, описываемого выражением [21], [22]

$$w_p(z) = \frac{\exp\left(-\left|\frac{z}{z_0}\right|^{\frac{1}{5}}\right)}{240z_0}, \quad (22)$$

здесь единственным параметром, характеризующим ИП является z_0 , описывающий некоторую среднюю величину ИП.

В случае, когда помеха представляет собой сумму АБГШ и ИП

$$w(z) = Nw_n(z) + (1 - N)w_p(z) \otimes w_n(z), \quad (23)$$

где N – весовой коэффициент, значение которого лежит в пределах от 0 до 1, а

$$w_n(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), \quad (24)$$

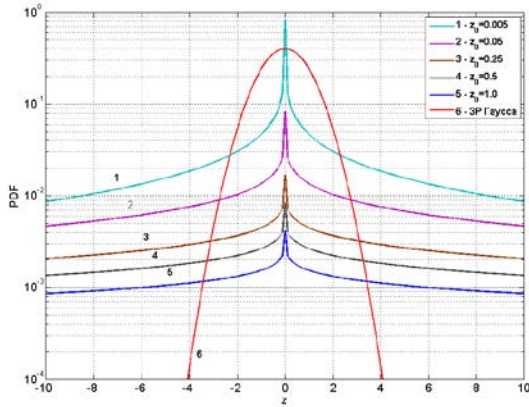


Рисунок 6

канале [23]

$$w(z) = \begin{cases} 0, & z < -b, \\ ce^{kz}, & -b \leq z \leq -a, \\ \hat{\Phi}(z), & -a < z < a, \\ ce^{-kz}, & a \leq z \leq b, \\ 0, & z > b, \end{cases} \quad (25)$$

где $\pm b$ – реальный динамический диапазон сигнала, связанный с ограничениями на уровень сигнала в канале связи, $\pm a$ – диапазон значений сигнала, в пределах которого его ЗР описывается гауссовой кривой $\hat{\Phi}(z)$, c и k – параметры экспоненциальной функции, описывающей ЗР на интервалах $a \leq |z| \leq b$. Параметр a связан с параметрами c и k соотношением

$$w(z) = k \pm \sqrt{k^2 - 2\ln(c\sqrt{2\pi})}. \quad (26)$$

Закон распределения Вейбулла (Weibull)

Использование ЗР Вейбулла удобно в особенности, когда требуется реализовать компьютерные модели импульсных СП, поскольку позволяет относительно просто организовать генерацию случайных величин с данным ЗР. Кроме того, как показано в [24] при определенных параметрах ЗР Вейбулла и ЗР Хенкеля-Кеслера совпадают.

ЗР Вейбулла для амплитуды ИП может быть представлен в виде

$$w(|\dot{Z}|) = \alpha b |\dot{Z}|^{\alpha-1} \exp(-b|\dot{Z}|^\alpha), \quad (27)$$

$$W(|\dot{Z}| \geq z_0) = \exp(-bz_0^\alpha),$$

- ЗР дискретного АБГШ.

Вид данного закона распределения для различных значений параметра z_0 приведен на рисунке 6.

Модель Фенника (Fennick)

На основе анализа экспериментальных данных о шумах в телефонных каналах была предложена следующая аппроксимация ДЗР помехи в

где $\alpha > 0, b > 0$ - параметры формы ЗР, $|\dot{Z}| \geq 0, z_0 \geq 0$.

Вид ДЗР и ИЗР Вейбулла для различных значений параметров приведен на рисунках 7 и 8.

Для генерации случайных величин (СВ) с ЗР Вейбулла на основе СВ с ЗР Гаусса можно воспользоваться нелинейным преобразованием без памяти (memoryless nonlinear transform – MNLT) вида $y = y(x)$ [24], [25]

$$y = \begin{cases} \left[\frac{1}{b} \ln \left(\frac{1}{\operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}, & x \geq 0, y \geq 0, \\ - \left[\frac{1}{b} \ln \left(\frac{1}{2 - \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}, & x < 0, y < 0, \end{cases}, \quad (28)$$

при этом взаимосвязь корреляционных функций процессов на входе и выходе нелинейного элемента имеет вид

$$R_y(t) = \langle y(0)y(t) \rangle = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_x(t)^n}{2^n n!} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-x^2/2) H_n(x/\sqrt{2}) y dx \right]^2, \quad (29)$$

где $H_n(u) = (-1)^n \exp(u^2) \frac{d^n}{du^n} \exp(-u^2)$ - полином Эрмита n-ой степени.

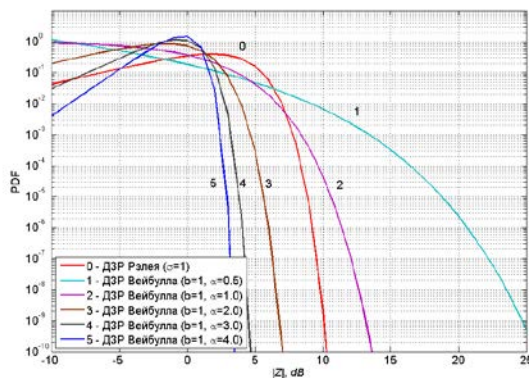


Рисунок 7

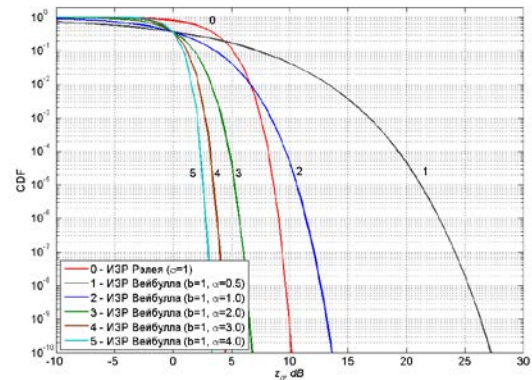


Рисунок 8

4 Анализ результатов экспериментальных измерений

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

Примеры экспериментально полученных ДЗР мгновенных значений синфазной компоненты излучения лабораторного макета ЭРД СПД-100-2 [26] для одного из режимов работы для частот 2.06 и 7.19 ГГц приведены соответственно на рисунках 9 и 10. На этих же графиках приведены некоторые теоретические ЗР для параметров наиболее близких к параметрам экспериментально полученных реализаций. Для мгновенных значений квадратурной компоненты излучения ЭРД результаты в целом совпадают с результатами, полученными для синфазной компоненты.

Для диапазона 2.06 ГГц, как видно из рисунка 9, ДЗР Лапласа и Гильберта недостаточно хорошо аппроксимируют экспериментально полученные ДЗР мгновенных значений синфазной (квадратурной) составляющей излучения ЭРД.

В тоже время, как видно из сравнения экспериментальных и теоретических результатов в диапазоне 7.19 ГГц (рисунок 10), ДЗР мгновенных значений Лапласа и Гильберта оказываются достаточно близкими к экспериментальным результатам.

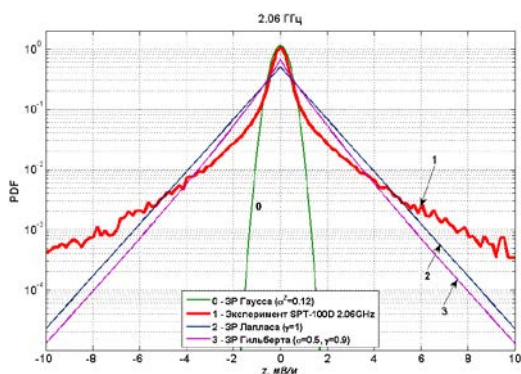


Рисунок 9

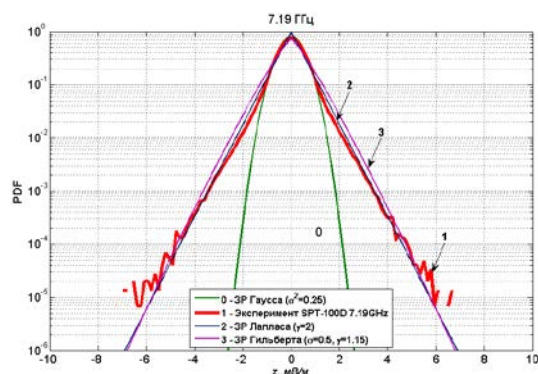


Рисунок 10

Сравнение ИЗР амплитудной огибающей излучения ЭРД для тех же диапазонов частот приведено на рисунках 11 и 12. В случае ИЗР амплитудной огибающей для диапазона 2.06 ГГц наиболее близкими к экспериментальным результатам оказываются: в области средних и больших уровней сигнала - ЗР Хорнера-Харвуда, Мерца и Вейбулла. Причем в области больших уровней сигнала ЗР Хорнера-Харвуда, Мерца и Вейбулла определяют соответственно верхнюю и нижнюю границы значений экспериментальных данных. В области малых уровней сигнала наилучшее согласование обеспечивает ЗР Вейбулла.

Для ИЗР амплитудной огибающей в диапазоне частот 7.19 ГГц в области относительно больших значений сигнала с экспериментальными данными хорошо

согласуются ЗР Лихтера и Вейбулла, а в области малых уровней сигнала - ЗР Вейбулла (рисунок 12).

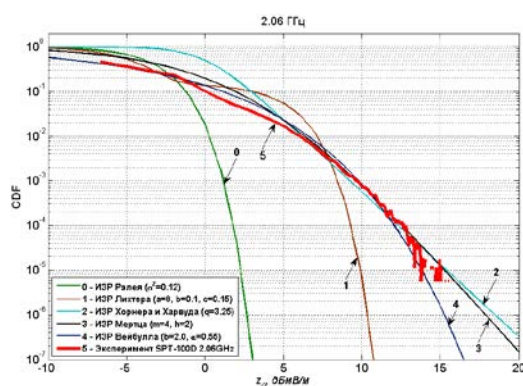


Рисунок 11

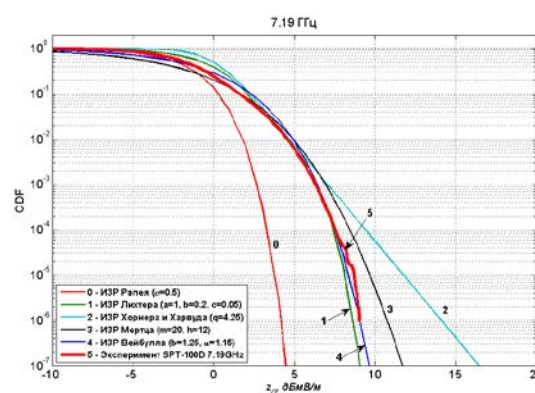


Рисунок 12

5. Выводы

Таким образом, сравнение теоретических законов распределения случайных импульсных процессов и экспериментальных результатов для излучения ЭРД показывает, что в настоящее время для описания не может быть рекомендована какая-то одна эмпирическая модель закона распределения.

В зависимости от режима работы ЭРД и используемого частотного диапазона для описания статистических характеристик излучения ЭРД могут использоваться законы распределения Мерца, Вейбулла, Лапласа и Гильберта. Причем указанные модели обеспечивают различную точность описания реальных ЗР для различных уровней сигнала.

6. Библиографический список

1. 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.
2. Spaulding A.D. and David Middleton. Optimum Reception in an Impulsive Interference Environment. Office of Telecommunications OT Report 75-67. June 1975.
3. Furutsu, K., and T. Ishida, On the theory of amplitude distribution of impulsive random noise and its application to the atmospheric noise, Journal of the Radio Research Laboratories (Japan), Vol. 7, No. 32, 1960.

4. Лихтер Я.И. О некоторых статистических свойствах атмосферных радиопомех. "Радиотехника и электроника". 1956, т. 1, № 10, с. 1295-1302.
5. Ishida, T., Bulletin of the XIIth Symposium of the Radio Research Laboratory, Tokyo, 23-24 October, 1956, p.113-120.
6. Ishida, T., Statistical characteristics of atmospheric noise 1966-1969, Radio Research Laboratory Ministry of Post and Telecommunications, Tokyo, Japan, 1969, p. 1-31.
7. Crichlow, W.Q., A.D. Spaulding, C.J. Roubique, and R.T. Disney, Amplitude probability distribution of atmospheric radio noise, National Bureau of Standards Monograph 23, 1960.
8. Mertz, P., Model of impulsive noise for data transmission, IRE Trans. Comm. Sys., 1961, June, p.130-137.
9. Mertz P. Impulse Noise and Error performance in Data Transmission. The RAND Corporation. RV-4526-PR, April 1965.
10. Engel, J.S., Digital transmission in the presence of impulsive noise, Bell System Tech. J., Oct., 1965, p. 1699-1743.
11. Kneuer, J.G., A simplified physical model for amplitude distribution of impulsive noise, IEEE Trans. Comm. Sys., December 1964, Vol. COM-12, p.220.
12. Galejs, J., Amplitude distribution of radio noise at ELF and VLF, J. Geophys. Res., 1966, Vol. 71, 201-216.
13. Galejs, J., Amplitude statistics of lightning discharge currents and ELF and VLF radio noise, J. Geophys. Res., 1967, Vol. 72, 2943-2953.
14. Nakai, T., and M. Nagatani, Synchronous analysis of statistical parameters of atmospheric noise, Proc. Res. Inst. Atmos. (Japan), 1970, Vol. 17, 29-41.
15. Shepelavey B. Non-Gaussian Atmospheric Noise in Binary Data Phase Coherent Communication Systems // IEEE Trans. On Communication Syst., 1963, v. CS-11, № 3, p. 280—284.
16. Gilbert E. N., Pollak H. O. Amplitude Distribution of Shot Noise // Bell Syst. Techn. J., 1960, № 2, p. 333—350.

17. Понкратов В. С., Антонов О. Е. Об оптимальном приеме бинарных сигналов на фоне негауссовых помех // Электросвязь, 1967, № 9, с. 25—33.
18. R.J. Marks II, G.L. Wise and D.G. Haldeman, "Further results on detection in Laplace noise", Proceedings of the 1977 Midwest Symposium on Circuits and Systems, Texas Tech University, Lubbock, August 1977.
19. R. J. Marks, G. L. Wise, D. G. Haldeman, and J. L. Whited, "Detection in Laplace noise," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-14, pp. 866–872, Nov. 1978.
20. Norman C. Beaulieu and Sijing Jiang. ML Estimation of Signal Amplitude in Laplace Noise. IEEE Globecom 2010 proceedings, 2010, pp. 1-5. 978-1-4244-5637-6/10/2010 IEEE.
21. V. Moeyaert, P. Mégret, J.-C. Froidure, L. Robette, M. Blondel, Analytical formulation of the error probability of a QPSK transmission impaired by the joint action of Gaussian and impulse noise, Second IASTED International Conference on Communication Systems and Networks, Benalmadena, Spain, August 2003, pp. 381-385.
22. Henkel W. and Kesler T. A Wideband Impulsive Noise Survey in the German Telephone Network: Statistical Description and Modeling. AEU, 1994, Vol. 48, No. 6, p. 277-288.
23. Fennick J.H. Amplitude Distributions of Telephone Channel Noise and Model for Impulse Noise. The Bell System Technical Journal. December 1969, pp. 3243-3263.
24. 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.
25. R. J. A. Tough and K. D. Ward, "The correlation properties of gamma and other non-Gaussian processes generated by memoryless nonlinear transformation," J. Physics D:Applied Physics, vol. 32, pp. 3075 – 3084, December 1999.
26. Andrey Plokhikh, Nikolay Vazhenin, Vladimir Kim, Evgeniy Sidorenko, and Galina Soganova. Study for the Influence of Stationary Plasma Thruster Operating Modes on its Electromagnetic Emission. The 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany. September 11 – 15, 2011. IEPC-2011-094.

Сведения об авторе

Важенин Николай Афанасьевич, доцент Московского авиационного института, ведущий научный сотрудник НИИПМЭ Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-40-82, 8-916-175-19-95; e-mail: N.Vazhenin@mai.ru