

Исследование спектральных плотностей мощности доплеровских флуктуаций в мешающих отражениях для сантиметрового диапазона радиоволн

С.Н. Миронов

*Муромский институт Владимирского государственного университета
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23
E-mail: radio@mivlgu.ru*

Приведены результаты исследования спектральных плотностей мощности доплеровских флуктуаций для мешающих отражений от импульсного объёма пассивных помех в сантиметровом радиодиапазоне. По критерию χ^2 обоснованы зависимости для аппроксимаций экспериментальных спектральных плотностей мощности флуктуаций.

The brought results of research spectral powers density of Doppler fluctuations for disturbing reflections from passive hindrances pulsed volume in centimeter radio range. Dependency is motivated on criterion χ^2 for approximation of experimental spectral powers density of fluctuations.

В радиоканале распространения [1, 2] электромагнитных волн могут находиться как точечные, так и распределённые отражающие объекты или пассивные помехи (ПП) [3, 4]. Дисперсное отражение радиоволн от подвижной шероховатой поверхности ПП приводит к появлению доплеровских флуктуаций в мешающих отражениях, принимаемых радиотехнической системой (РТС). Доплеровские флуктуации, обусловленные движением ПП, являются неинформативным процессом для РТС и, поэтому, подвергаются дальнейшей компенсации [3].

В лабораторных условиях проводить достаточно полное исследование работы трактов обработки РТС при искажениях полезного сигнала и моделировать каналы передачи информации при действии на полезный сигнал комплекса помех позволяют имитаторы сигналов [1, 2, 5]. Применение имитаторов [1, 2, 5] обеспечивает конкурентоспособность РТС при их разработке или модернизации посредством снижения временных и материальных затрат на проведение испытаний РТС.

Работа имитаторов сигналов основана на алгоритмах формирования входных воздействий для РТС. Для построения моделей входных воздействий и программной реализации имитатора сигналов, как правило, априорно задаются статистические характеристики. Одной из основных статистических характеристик доплеровских флуктуаций, как случайного процесса, является спектральная плотность мощности (СПМ).

Большинство видов одномодовой СПМ доплеровских флуктуаций описывается гауссовским или степенным выражениями [3, 4]. Эти аппроксимации СПМ являются симметричными относительно некоторой центральной частоты. Тем не менее, теоретические исследования и проведённые расчёты СПМ доплеровских флуктуаций показывают несимметричность их форм [6]. Симметричные СПМ доплеровских флуктуаций являются частным случаем несимметричных СПМ, поскольку симметричность энергетических спектров относительно некоторой центральной частоты означает равенство эффективных поверхностей рассеяния отражателей, движущихся в ПП под действием ветра по направлению к РТС и от РТС.

Достоверность результатов исследований РТС с помощью имитаторов зависит от адекватности применяемых в них моделей входных воздействий. Для уточнения формы СПМ доплеровских флуктуаций и обеспечения адекватности построения модели флуктуаций необходимо согласование СПМ с экспериментальными данными.

Экспериментальные записи низкочастотных флуктуаций были получены при по-

мощи импульсных радиолокаторов «КРЕДО» и «ФАРА» с длинами волн 2 и 3 см соответственно. Полученные записи не всегда могут быть использованы для других РТС, поскольку режимы их работы могут быть различны. Однако СПМ доплеровских флуктуаций не зависит от режимов работы конкретной РТС и может быть использована для синтеза случайных процессов. При синтезе адекватной модели входных воздействий по заданной СПМ используются аналитические зависимости, близкие к экспериментальным СПМ. В связи с этим актуальной задачей является проверка по некоторому критерию гипотезы о соответствии аппроксимирующей аналитической зависимости экспериментальным СПМ доплеровских флуктуаций.

В работе исследовались СПМ флуктуаций для трех типов ПП: поверхность земли с растительностью не более 0,5 м; гидрометеоры; облако дипольных отражателей в виде волокна. Эхо-сигналы от подстилающей поверхности были записаны с применением радиолокатора «КРЕДО», остальные – радиолокатором «ФАРА» с одного из каналов дальности при неподвижном антенном луче в обоих случаях. С выхода фазовых детекторов радиолокаторов на звуковую карту персонального компьютера производилась запись флуктуаций, подлежащих исследованию их энергетических спектров. Полученный случайный процесс в пределах импульсного объема при неподвижной антенне радиолокатора можно считать стационарным небелым шумом. Оценка СПМ такого сигнала в дискретном времени вычислялась через дискретное преобразование Фурье с учетом амплитудно-частотной характеристики приемного тракта радиолокатора. Разрешение по частоте было выбрано 1 Гц, что соответствует секундным записям реализаций. При частоте дискретизации 4 кГц объем выборки составил 4000 отсчетов. Число реализаций равно 200.

На рисунке 1 толстой сплошной линией показана нормированная СПМ доплеровских флуктуаций для поверхности земли с растительностью не более 0,5 м. Экспериментальная СПМ имеет пик и медленно спадающие от него «хвосты». Полученный результат можно объяснить из следующего. Узкополосный пик около нулевой частоты характеризует флуктуации для неподвижной подстилающей поверхности, а медленно спадающие «хвосты» – для растительности, движущейся под действием ветра.

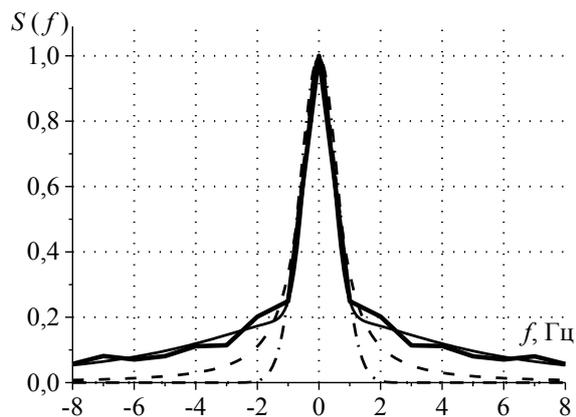


Рис. 1. СПМ флуктуаций.

На рисунках 2 и 3 толстыми сплошными линиями показаны нормированные СПМ флуктуаций для гидрометеоров и облака дипольных отражателей соответственно. Энергетические спектры, представленные на рисунках 2 и 3, имеют выбросы, что обусловлено конечным объемом выборки и ограниченным числом реализаций флуктуаций. Для уточнения форм СПМ флуктуаций были получены их сглаженные оценки. Сглаживание спектров проводилось по методу k -ближайших соседей с адаптивным выбором k . Результаты сглаживания изображены на рисунках 2 и 3 тонкими сплошными линиями. Из рисунков видно, что сглаженные СПМ флуктуаций для рассматриваемых ПП являются унимодальными и несимметричными относительно некоторой центральной частоты. Подобное поведение форм СПМ отмечалось также в [6].

Присутствие центральной частоты в СПМ доплеровских флуктуаций обусловлено движением объектов. Несимметричность СПМ можно объяснить интенсивным движением элементов объекта (капель или волокна) в турбулентном потоке, который создают предшествующие элементы, и их большей эффективной поверхностью рассеяния по

сравнению с медленно движущимися элементами. Это обеспечивает преобладание высокочастотных составляющих в энергетическом спектре, т.е. его несимметричность.

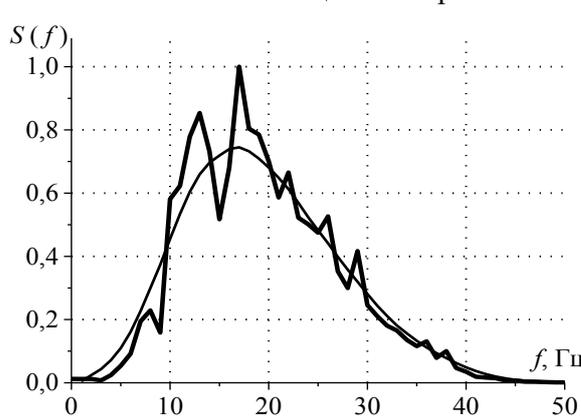


Рис. 2. СПМ флуктуаций.

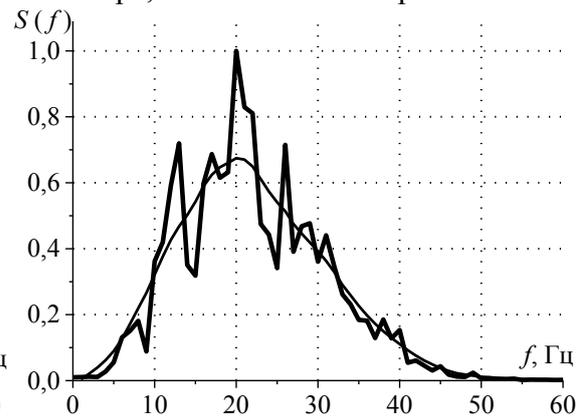


Рис. 3. СПМ флуктуаций.

Аналитические зависимости для описания СПМ задаются следующими спектральными параметрами [7]: дисперсией флуктуаций σ_x^2 , центральной частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$ и шириной полосы частот $\Delta\omega = 2\pi \Delta f$ по уровню 0,5. Для описания степенной зависимости [4] кроме рассматриваемых параметров дополнительно вводится показатель степени $w \in (2; 6)$.

На рисунке 1 штрихпунктирной линией представлены результаты аппроксимации экспериментальной СПМ флуктуаций с помощью гауссовской зависимости, пунктирной линией – с помощью степенной зависимости и параметром $w = 2$, тонкой сплошной линией – при использовании суммы гауссовского и степенного выражений с различными параметрами. Параметры аппроксимирующих СПМ находились по минимуму среднеквадратической ошибки и сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Зависимость аппроксимации	σ_x^2 , Вт	f_0 , Гц	Δf , Гц	χ^2	
Гауссовская	1,0	0	1,44	1010,1	
Степенная ($w=2$)	1,0	0	1,41	613,4	
Сумма зависимостей	гауссовская	0,797	0	1,02	6,2
	степенная	0,203	0	9,55	

Обоснование выбора аналитических зависимостей, наиболее близких к экспериментальным СПМ, проводилось по критерию согласия χ^2 . Для числа степеней свободы $k = 60$ и уровня значимости $\alpha = 0,01$ получается пороговое значение $\chi_{k,\alpha}^2 = 88,38$. В таблице 1 приведены величины χ^2 для аппроксимирующих выражений. Из сравнения полученных значений χ^2 (табл. 1) с порогом следует, что принимается гипотеза об аппроксимации СПМ флуктуаций для земной поверхности с растительностью не более 0,5 м с помощью суммы гауссовского и степенного выражений.

Результаты аппроксимации нормированной сглаженной СПМ флуктуаций для гидрометеоров представлены на рисунке 4, где она изображена толстой точечной линией. Штрихпунктирной линией показана аппроксимация экспериментальной СПМ с помощью гауссовской зависимости, пунктирной линией – с использованием степенной зависимости (рис. 4). Спектральные параметры аппроксимирующих законов вычислялись по минимуму среднеквадратической ошибки и сведены в таблицу 2. Здесь же приведе-

ны величины χ^2 для аппроксимирующих зависимостей.

Из таблицы 2 следует, что не принимается гипотеза об аппроксимации экспериментальной СПМ с помощью гауссовской или степенной зависимостей. Поэтому необходимы более сложные зависимости.

В настоящей работе предлагается аппроксимация СПМ флуктуаций в виде двух ветвей гауссовской зависимости или составной гауссовской зависимости. По сравнению с известными видами аппроксимаций, например, полиномиальными или полигауссовскими она позволяет непосредственно задавать спектральные параметры флуктуаций перед моделированием.

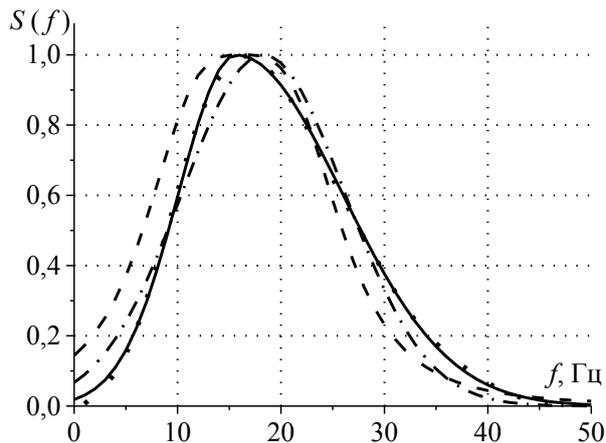


Рис. 4. Аппроксимация СПМ флуктуаций.

$$S(f) = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\ln 2}\sigma_1^2}{\sqrt{\pi}\Delta f_1} \exp\left(-4\ln 2\left(\frac{f-f_0}{\Delta f_1}\right)^2\right), & f < f_0, \\ \frac{2\sqrt{\ln 2}\sigma_2^2}{\sqrt{\pi}\Delta f_2} \exp\left(-4\ln 2\left(\frac{f-f_0}{\Delta f_2}\right)^2\right), & f \geq f_0, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_1^2 и σ_2^2 – дисперсии гауссовских зависимостей, образующих левую и правую ветви составной гауссовской зависимости соответственно; Δf_1 и Δf_2 – ширины полос гауссовских выражений, образующих левую и правую ветви гауссовской составной зависимости соответственно.

Таблица 2

Зависимость аппроксимации	σ_x^2 , Вт	f_0 , Гц	Δf_1 , Гц	Δf_2 , Гц	w	χ^2
Гауссовская	1,0	18,3	18,54	–	–	113,92
Степенная	1,0	16,28	19,31	–	3,42	155,53
Составная гауссовская	1,0	15,64	13,07	24,19	–	8,13

Аппроксимация экспериментальной СПМ с использованием составной гауссовской зависимости представлена на рисунке 4 тонкой сплошной линией. Из таблицы 2 следует, что принимается гипотеза об аппроксимации СПМ флуктуаций для гидрометеоров с помощью составной гауссовской зависимости.

На рисунке 5 толстой точечной линией показана нормированная сглаженная СПМ флуктуаций для облака диполей в виде волокна. Результаты аппроксимации экспериментальной СПМ с помощью гауссовского выражения представлены штрихпунктирной линией, с помощью степенной зависимости – пунктирной линией, с применением составного гауссовского выражения – тонкой сплошной ли-

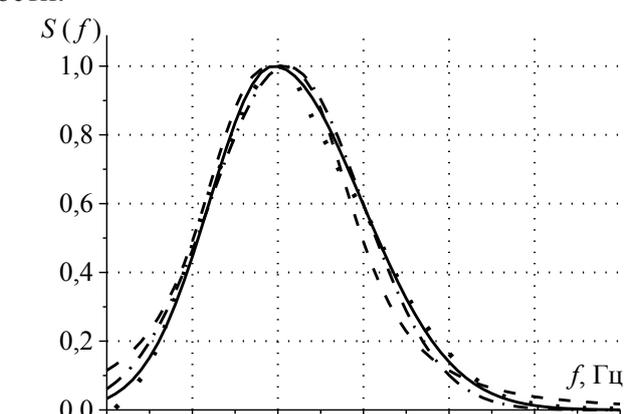


Рис. 5. Аппроксимация СПМ флуктуаций.

нией (рис. 5).

Параметры аппроксимирующих СПМ флуктуаций вычислялись по минимуму среднеквадратической ошибки и сведены в таблицу 3, где также приведены величины χ^2 для зависимостей аппроксимации.

Таблица 3

Зависимость аппроксимации	σ_x^2 , Вт	f_0 , Гц	Δf_1 , Гц	Δf_2 , Гц	w	χ^2
Гауссовская	1,0	20,99	20,9	–	–	137,8
Степенная	1,0	19,98	19,72	–	2,89	80,22
Составная гауссовская	1,0	19,47	17,56	24,36	–	22,57

Результаты выбора аналитической зависимости СПМ по критерию согласия χ^2 в соответствии с таблицей 3 и выбранным выше порогом показывают, что степенная и составная гауссовская зависимости удовлетворяют принятию гипотезы об аппроксимации СПМ флуктуаций для облака дипольных отражателей в виде волокна.

При использовании зависимости (1) проще не описывать каждую её ветвь, а задавать обобщенные параметры СПМ: σ_x^2 , Δf

$$\Delta f = (\Delta f_1 + \Delta f_2) / 2; \sigma_i^2 = \sigma_x^2 \cdot \Delta f_i / \Delta f; i = 1, 2. \quad (2)$$

Степень асимметрии СПМ (1), определяемая параметрами Δf_1 и Δf_2 , очевидно зависит от метеоусловий. Цель её выяснения выходит за рамки настоящего доклада и требует дополнительных экспериментальных исследований.

Итак, результаты исследования СПМ доплеровских флуктуаций в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн привели к следующему:

- 1) получено, что СПМ флуктуаций для гидрометеоров и облака диполей в виде волокна имеют унимодальный тип и являются несимметричными относительно центральной частоты, что обусловлено действием ветра;
- 2) получено, что СПМ флуктуаций для гидрометеоров и облака дипольных отражателей в виде волокна аппроксимируются составной гауссовской зависимостью;
- 3) полученные результаты могут применяться для синтеза мешающих отражений от ПП для наземных импульсных радиолокационных станций (РЛС) обзорного типа.

Исполнитель работы благодарен сотруднику ОАО «Лантан» Н.Г. Лапаеву за помощь в организации эксперимента.

Литература

1. Галкин А.П., Лапин А.Н., Самойлов А.Г. Моделирование каналов систем связи. – М.: Связь, 1979. – 96 с.
2. Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М. Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
3. Бакулев П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
4. Брюховецкий А.С., Пузенко А.А. О спектре сигнала при поперечном движении затеняющихся отражателей // Радиотехника и электроника. – 1970. – т. 15. № 12. – С. 2533-2538.
5. Миронов С.Н. Структура имитатора цифровых сигналов // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сб. научн. трудов. – М.: Радиотехника, 2007.

– Вып. 8. – С. 82-85.

6. Sohel Malkiat Singh, Hayre Harbhajan S. Doppler radar return from two-dimensional random rough surfaces // IEEE Trans. Geosci. Electron., 1972, vol. 10, № 1, pp. 33-47.

7. Хайкин С., Карри Б.У., Кеслер С.Б. Спектральный анализ радиолокационных мешающих отражений методом максимальной энтропии // ТИИЭР. 1982. Т.70. №9. – С.51-62.