

АНАЛИЗ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМА БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В. И. Костылев, С. А. Панфилов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.04.2010 г.

Аннотация. В статье рассмотрены результаты эксперимента по исследованию шума бистатической радиотехнической системы. Проведен статистический и спектральный анализ полученных данных. Выполнено имитационное моделирование случайного процесса с характеристиками, близкими к полученным экспериментальным данным.

Ключевые слова: бистатические радиотехнические системы, шум, имитационное моделирование, статистические характеристики.

Abstract. The article describes the results of experiments on noise of bistatic radio system. A statistical and spectral analysis of the experimental data is provided. Implemented simulation modeling of random process with characteristics similar to the experimental data obtained.

Keywords: bistatic radio systems, noise, simulation modelling, statistical characteristics.

Имитационное моделирование в последнее время стало неотъемлемым этапом исследования и анализа в современной науке [1].

Это объяснимо тем, что зачастую провести или повторить эксперимент невозможно или требует значительных затрат. Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе.

Традиционно выделяют две задачи моделирования — прямую и обратную. В работе рассмотрена обратная задача моделирования — известно множество возможных моделей, из которых, на основе эмпирических знаний об исследуемом объекте, требуется выбрать нужную.

В качестве исследуемого объекта рассмотрена бистатическая радиотехническая система. Практический интерес к таким системам в последнее время неуклонно растет [2]. Бистатическая схема подразумевает разнесение в пространстве передающей и приемной частей.

Частный случай бистатической системы — просветная бистатическая система. Такая система реализуется, когда бистатический угол близок к развернутому. В отличие от наиболее распространенной моностатической (однопозиционной) системы, в которой приемник и передатчик совмещены в одном устройстве, просветные системы

обладают как преимуществами, так и недостатками. Фундаментальное различие между моностатической и просветной схемами состоит в различии принципов приема рассеянного сигнала. Так, при традиционной схеме, цель определяется отраженной электромагнитной волной, которая детектируется принимающей антенной. Если же цель в силу физических свойств не отражает сигнал, то для моностатического радара она будет невидимой. Обратный эффект будет наблюдаться для просветной системы — цель будет закрывать передаваемую электромагнитную волну и приемник будет принимать «теневой» сигнал. К одному из основных недостатков просветных систем относят высокий уровень шума, получаемый приемником от области пространства между ним и передатчиком.

Шум является неотъемлемой частью влияния окружающей среды на работу всех радиолокационных систем. Влияние шума, создаваемого окружающей средой, зачастую может превосходить влияние исследуемой цели на значения сигнала на выходе приёмника. Известно [3], что при бистатической радиолокации на морской поверхности уровень шума может достигать значений в 10 дБм². Анализ влияния шума на работу бистатических систем в основном рассматривается в рамках анализа спектра шума или шумовой компоненты полезного сигнала. Довольно хорошо теоретически исследованы вопросы применения различных типов радаров, их сравнение. В частности (см. напри-

мер [3]), рассмотрен вопрос по уменьшению уровня шума при различных типах поверхностей в случае использования различных типов радаров. Рассмотрение носит в основном теоретический характер, а исследования экспериментальных данных бистатических систем представлены довольно ограниченно.

В настоящей статье проанализирован шум, полученный как результат эксперимента по исследованию бистатической системы, и выполнено имитационное моделирование случайного процесса с близкими к экспериментальным данным характеристиками. Приемник и передатчик бистатической радиотехнической системы располагались на теннисном корте, огороженном металлической сеткой, сквозь которую проросли различные растения (см. рис. 1). Базовая линия (линия соединяющая приемник и передатчик) всегда была параллельна оградительной сетке, а бистатический угол был близок к развернутому. Приемник и передатчик этой системы располагались на расстоянии 18 метров друг от друга.

Передатчик излучал непрерывную монохроматическую электромагнитную волну с несущей частотой 900 МГц. В приемнике происходила обработка сигнала, в основном связанная с переносом центральной частоты спектра на нулевую частоту. Далее полученный сигнал записывался в память компьютера с использованием программной среды MATLAB. При этом частота дискретизации полученных данных составляла 10 кГц.

Измерения шума проводились для трех различных поляризаций излучаемой электромагнитной волны (круговая, вертикальная и горизонтальная), а так же для трех расстояний базовой линии от оградительной сетки: 1 метр, 2 метра и 4 метра. Измерения проводились при достаточно сильном ветре на корте.

При анализе различных радиотехнических процессов в качестве модели шума зачастую

рассматривается модель белого гауссова шума, которая характеризуется равномерным распределением мощности по всему диапазону частот и гауссовым распределением плотности вероятности его значений.

Спектральные и статистические характеристики являются основными характеристиками, используемыми для описания случайных процессов. Спектральный анализ полученного шума был выполнен с использованием метода множественной классификации сигналов (метод MUSIC). В основе метода лежит анализ собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала. Графики псевдоспектра экспериментально полученного шума, рассчитанные в программной среде MATLAB, показаны на рис. 2.

Расчет статистических характеристик выполнен в пакете Statistic Toolbox программной среды Matlab, а гистограммы плотности вероятности значений и их гауссовы огибающие построены в пакете Distribution Fitting Toolbox. Гауссовы огибающие построены по методу максимального правдоподобия.

Как видно из предоставленных графиков спектр экспериментального шума всех измерений обладает двумя явными пиками на частотах в окрестностях 350 Гц и 3650 Гц. Для расстояния 2 метра, горизонтальной и вертикальной поляризаций пик в окрестности частоты 3650 Гц не выражен явно. Наличие пиков спектра может быть связано с резонансными явлениями, происходящими в окружающей среде.

Статистические характеристики экспериментального шума, приведенные в таблице 1, схожи для всех измерений, и выявить какой-либо зависимости ни от расстояния между базовой линией и оградительной сеткой, ни от поляризации излучаемой волны не удалось. Для всех измерений характерно отличие коэффициентов асимметрии и эксцесса от нуля, что гово-



Рис. 1. Вид-схема эксперимента. А — блок приёмника, В — передающая антенна (передатчик), С — анемометр, измеряющий скорость и направление ветра, D — видеокамера

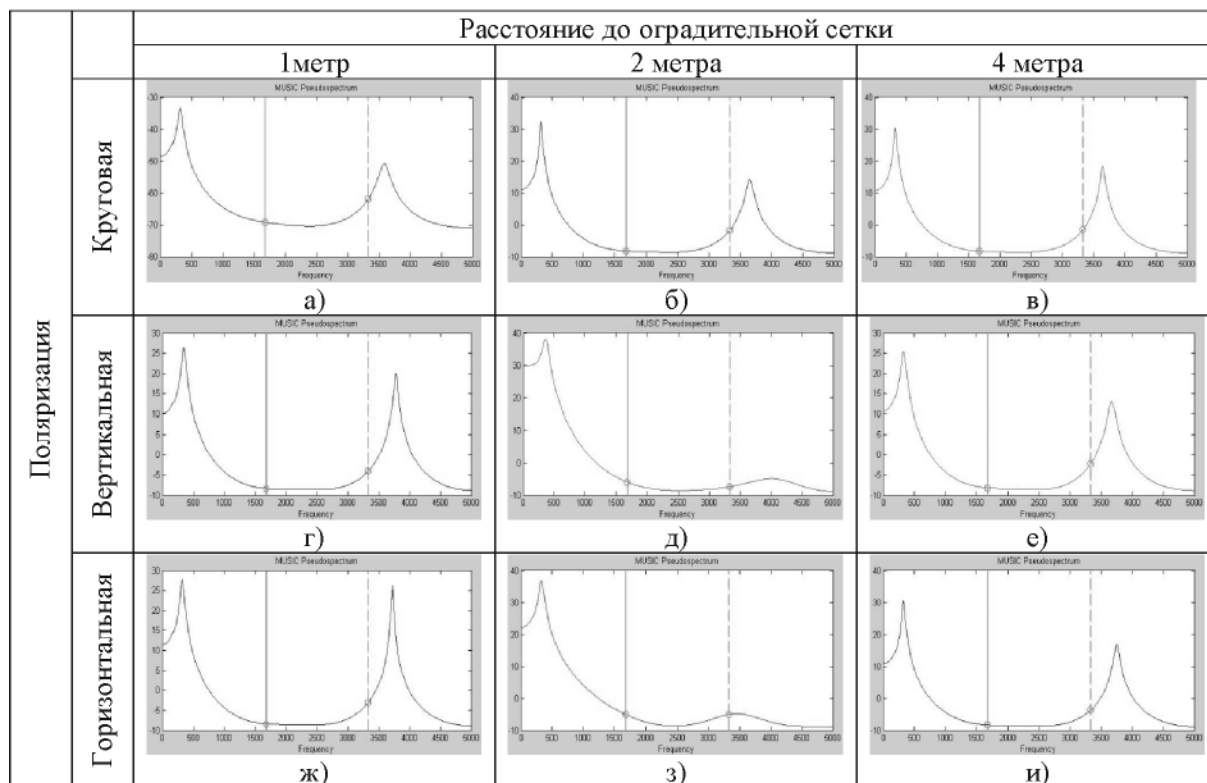


Рис. 2. Графики псевдоспектра экспериментального шума, полученные при использовании метода MUSIC: а) — расстояние 1 метр, круговая поляризация, б) — расстояние 2 метра, круговая поляризация, в) — расстояние 4 метра, круговая поляризация, г) — расстояние 1 метр, вертикальная поляризация, д) — расстояние 2 метра, вертикальная поляризация, е) — расстояние 4 метра, вертикальная поляризация, ж) — расстояние 1 метр, горизонтальная поляризация, з) — расстояние 2 метра, горизонтальная поляризация, и) — расстояние 4 метра, горизонтальная поляризация

Таблица 1

Характеристики	Вид поляризации								
	Круговая			Вертикальная			Горизонтальная		
Расстояние до забора	1 метр	2 метра	4 метра	1 метр	2 метра	4 метра	1 метр	2 метра	4 метра
Среднее гармоническое	0.0042	-0.0006	-0.0186	-0.0008	0.0039	0.0032	-0.0035	0.0000	0.0016
Коэффициент эксцесса	2.7717	2.6489	2.7836	2.9423	2.9687	2.7203	3.0893	3.5126	3.0805
Арифметическое среднее $1.0e-006$ *	0.0007	-0.0044	-0.0045	-0.1177	-0.0000	-0.0002	-0.0047	-0.0000	-0.0015
Медиана	0.0060	-0.0169	-0.0135	0.0020	0.0187	-0.0024	0.0036	0.0018	-0.0003
Максимальное значение	0.0071	0.0092	0.0085	0.0076	0.0190	0.0053	0.0080	0.0151	0.0087
Размах выборки	0.0147	0.0181	0.0167	0.0151	0.0385	0.0101	0.0163	0.0308	0.0179
Оценка коэфф. асимметрии	-0.1792	0.2533	0.1992	-0.0466	-0.1587	0.0934	-0.1056	-0.0945	-0.0186
Оценка ср. кв. отклонения	0.0019	0.0024	0.0021	0.0016	0.0040	0.0013	0.0017	0.0036	0.0021
Дисперсия $1.0e-005$ *	0.0360	0.0556	0.0428	0.0269	0.1619	0.0166	0.0298	0.1313	0.0443

рит об отличии распределения плотности вероятности экспериментального шума от гауссовского. Это подтверждается рис. 3, на котором приведены гистограммы распределения плотности вероятности и их гауссовы огибающие.

Экспериментальный шум бистатической радиотехнической системы не является белым и не является строго гауссовым, хотя и близок к нему. Полученные статистические и спектральные характеристики берутся, как основа для моделирования.

Рассмотрим метод линейного преобразования [4], который используется для моделирования отсчетов случайного процесса с заданной корреляционной функцией в заранее известные моменты времени, не обязательно равноотстоящие.

Идея метода заключается в линейном преобразовании некоррелированного вектора X в коррелированный вектор Y . Некоррелированный вектор X имитируется с помощью датчиков случайных чисел. На практике для моделиро-

вания вектора X используется встроенная функция MATLAB “rand”. Вектор Y , представляющий моделируемый случайный процесс, формируется из X с помощью линейного преобразования — умножения на квадратную матрицу преобразования A :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = [x_1 x_2 \dots x_N]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix},$$

$$Y = AX, \quad Y = [y_1 \dots y_k]^T.$$

Очевидно, что элементы матрицы A должны быть определены по заданным корреляционным функциям. Известно, что корреляционная функция и спектральная плотность мощности слу-

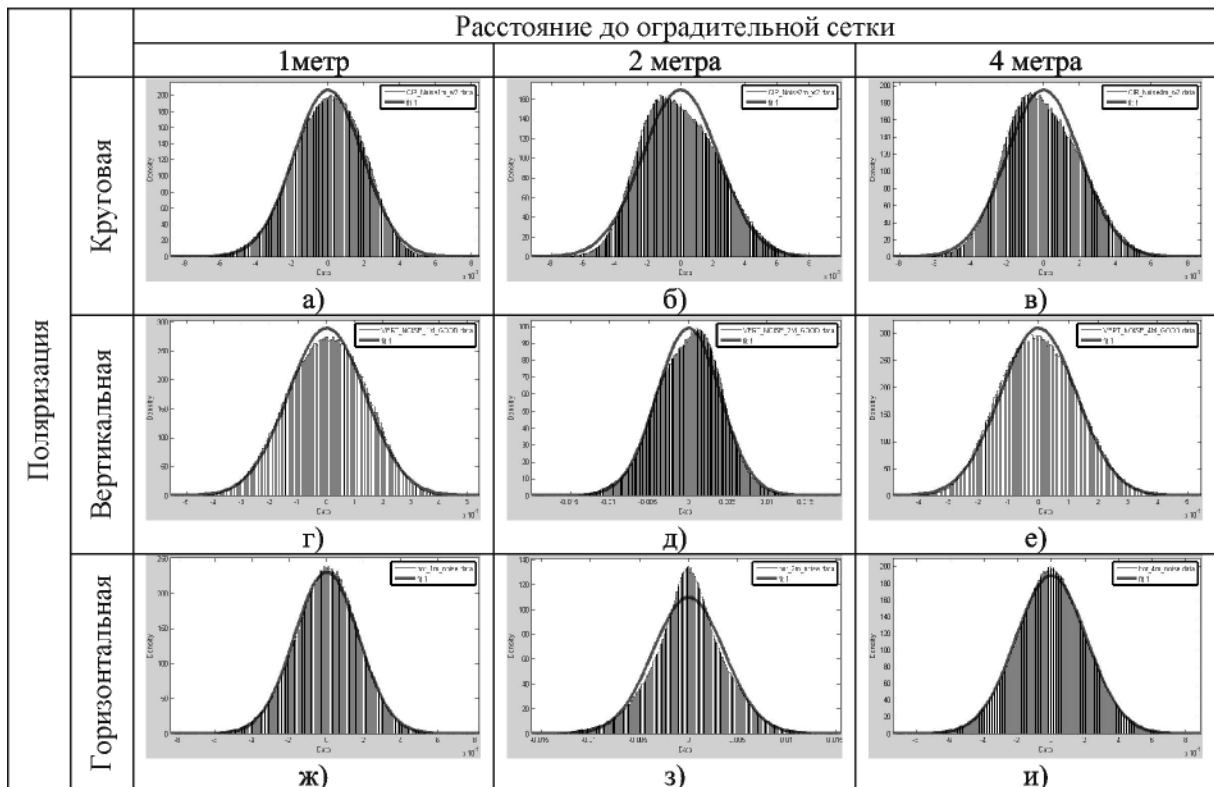


Рис. 3. Гистограммы распределения значений экспериментального шума и гауссовы огибающие: а) – расстояние 1 метр, круговая поляризация, б) – расстояние 2 метра, круговая поляризация, в) – расстояние 4 метра, круговая поляризация, г) – расстояние 1 метр, вертикальная поляризация, д) – расстояние 2 метра, вертикальная поляризация, е) – расстояние 4 метра, вертикальная поляризация, ж) – расстояние 1 метр, горизонтальная поляризация, з) – расстояние 2 метра, горизонтальная поляризация, и) – расстояние 4 метра, горизонтальная поляризация.

чайного процесса связаны между собой преобразованием Фурье. Кроме того, известно [5], что энергетический спектр шума на выходе линейной системы равен произведению энергетического спектра входного шума на квадрат модуля передаточной функции (комплексной частотной характеристики) системы.

Таким образом, в качестве метода моделирования целесообразно выбрать метод формирующего фильтра, суть которого состоит в нахождении передаточной функции цифрового фильтра. То есть, необходимо найти передаточную функцию цифрового фильтра такую, что при входном случайном процессе "rand", на выходе фильтра должен быть получен случайный процесс с характеристиками, близкими к экспериментальным данным. Расчет фильтра выполнялся в программной среде Matlab методом прямого синтеза рекурсивных фильтров. При этом учитывался тот факт, что коэффициенты числителя функции передачи фильтра связаны с его комплексной частотной характеристикой линейным образом и влияют на ее форму значительно слабее, чем коэффициенты знаменателя.

Как известно [5], при авторегрессионном оценивании спектра сигнала, сигнал формируется путем пропускания дискретного шума через «чисто рекурсивный» фильтр N-го порядка.

Для реализации данного алгоритма была написана программа в среде MATLAB. Программа позволяет по заданному случайному процессу (экспериментальные данные шума в нашем случае) смоделировать случайный процесс с характеристиками, близкими к заданному. Кроме того, программа позволяет вычислять характеристики формирующего фильтра с различной точностью, задавая порядок фильтра.

Входными данными для программы являются: случайный процесс, по подобию которого требуется моделировать; необходимый порядок фильтра; размер массива выходного случайного процесса.

Основной решаемой задачей программы является нахождение коэффициентов A и B таких, что частотная характеристика рекурсивного фильтра с функцией передачи

$$\frac{A(z)}{B(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n)z^{-(n-1)}}{1 + a(1)z^{-1} + \dots + a(n)z^{-(n-1)}}$$

близка к частотным характеристикам входного шума.

Сначала определяется полином знаменателя, при этом числитель функции передачи считается равным единице и задача оптимизации сводится к нахождению полинома знаменателя. Он вычисляется путем решения модифицированных уравнений Юла-Уолкера относительно коэффициентов корреляции, которые вычисляются, как обратное преобразование Фурье от соответствующего импульсного отклика.

Числитель вычисляется в 4 этапа. Во-первых, вычисляется полином числителя, соответствующий разложению энергетической частотной характеристики. Затем вычисляется отклик, соответствующий числителю и знаменателю. Следующий шаг — факторизация спектра с целью получения импульсного отклика фильтра. И наконец, проводится оптимизация полинома числителя при помощи метода наименьших квадратов.

Распределение плотности вероятности значений смоделированного случайного процесса показано на рис. 4, а его псевдоспектр показан на рис. 5.

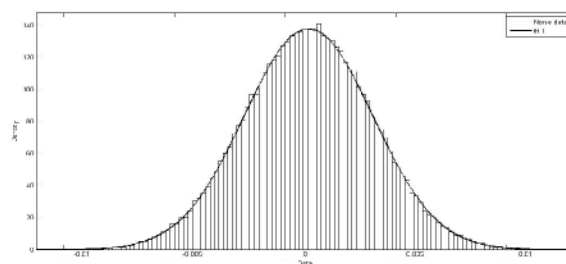


Рис. 4. Гистограмма распределения плотности вероятности смоделированного шума и график огибающей нормальной функции распределения

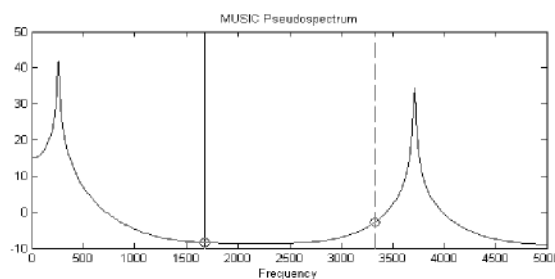


Рис. 5. Псевдоспектр смоделированного шума, построенный с помощью метода MUSIC

Таким образом, экспериментальный шум, полученный с помощью бистатической радио-

технической системы нельзя описать традиционной моделью белого гауссова шума. Для дальнейших исследований была необходима более точная модель, которая была реализована с помощью метода формирующего фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кельтон В.* Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. — СПб.: Питер: Издательская группа BHV, 2004. — 847 с.

2. *Kostylev V. I.* Bistatic Radars / V. I. Kostylev // Bistatic Radars : Principles and Practice / ed. M. Cher-

niakov. — Chichester, UK: Wiley, 2007. — Pt. II, chaps. 9–14. — P. 189–394.

3. *М. Cherniakov* Ultra-Wideband Forward Scattering Radar: Definition and Potential / M. Cherniakov, Cheng Hu, M. Gashinova, M. Antoniou, V. Sizov, L. Daniel // 4th EMRS DTC Technical Conference — Edinburgh, UK, 2007, Proceedings.

4. *Быков В. В.* Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1971. — 326 с.

5. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.

Владимир Иванович Костылев – Воронежский государственный университет, профессор кафедры электроники, д.ф.-м.н, профессор, тел.: (4732) 20-82-84, e-mail: prof.kostylev@gmail.com

Vladimir Ivanovich Kostylev – Voronezh State University, professor of chair of electronics, doctor of physical and mathematical sciences, professor, tel.: (4732) 20-82-84, prof.kostylev@gmail.com

Сергей Анатольевич Панфилов – Воронежский государственный университет, аспирант кафедры электроники, тел.: (4732) 20-82-84, e-mail: serzhps@gmail.com

Sergey Anatolievich Panfilov – Voronezh State University, post-graduate student of chair of electronics, tel.: (4732) 20-82-84, e-mail: serzhps@gmail.com