

Воробей В.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Приводится исследование и разработка имитационной модели процесса на входе радиолокационного приемника для решения задач сопровождения объектов в средствах автоматической радиолокационной прокладки навигационной радиолокационной станции.

Ключевые слова: радиолокация, моделирование.

Введение

Для объективной оценки эффективности технических решений цифровой обработки радиолокационных сигналов в средствах автоматической радиолокационной прокладки (САРП), учитывая сложность навигационных радиолокационных систем (НРЛС), требуется создание интерактивной среды имитационного моделирования.

Проблема заключается в том, что необходимо имитировать процесс на входе радиолокационного приемника сигналов, поступающих на цифровую обработку в САРП, который имеет сложный характер и состоит из смеси сигналов, отраженных от точечных и протяженных целей, взволнованной морской поверхности, атмосферных осадков, облачности, а также шумов приемника, хаотической импульсной помехи (несинхронная помеха), создаваемой работающими источниками радиолокационного излучения. **Частичное решение проблемы** приведено в публикациях [1-7].

Цель данной работы – исследование и разработка имитационной модели на входе усилителя промежуточной частоты радиолокационного приемника НРЛС сантиметрового диапазона волн для оценки эффективности первичной и вторичной цифровой обработки радиолокационного сигнала при решении задач автоматического сопровождения целей в САРП.

Модель закона распределения случайного процесса на входе радиолокационного приемника

Радиолокационный сигнал, отраженный от объекта, в НРЛС – это пачка импульсов, которую можно рассматривать как «постоянный» сигнал [8]

$$S = (s_1, \dots, s_n).$$

Компоненты вектора S равны амплитудам импульсов в пачке. Применяя аналогичные рассуждения к строю автоматического сопровождения цели, будем рассматривать «постоянный» сигнал – пакет импульсов (случайный составной вектор)

$$\vec{X}_{[n]} = (X_{1[n]}, \dots, X_{m[n]}, \dots, X_{M[n]}), \quad (1)$$

повторяющийся с периодом T_1 вращения антенны НРЛС в дискретные моменты времени $n=1, n=2, \dots$ (один раз за оборот антенны). Каждая из компонент $X_{m[n]}$ вектора $\vec{X}_{[n]}$ представляет, в свою очередь, вектор – пачку импульсов, размещенную на одном и том же пеленге m и повторяющуюся с периодом T_2 следования зондирующего импульса

$$X_m[n] = (x_{1m}[n], x_{2m}[n], \dots, x_{lm}[n], \dots, x_{Lm}[n]),$$

где $x_{lm}[n]$ ($l=1, \dots, L; m=1, \dots, M$) – компоненты вектора $X_m[n]$, равные амплитудам импульсов пачке на l -ной дальности и m -том пеленге.

Воздействие $\vec{X}_{[n]}$ представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала и помехи. Сигнал $\vec{X}_{[n]}$ в строке автосопровождения цели в амплитудных значениях огибающей высокочастотного импульса показан на рис.1. Здесь:

L – максимальное число импульсов на m пеленге, равное числу элементов разрешения по дальности в строке;

M – максимальное число импульсов на l дальности, равное числу элементов разрешения по пеленгу в строке;

x_{lm} – импульс на входе приемника, соответствующий lm элементу разрешения строка;

n – дискретное время ($n=1$ – первый оборот антенны, $n=2$ – второй оборот антенны, ...).

Эффективная площадь рассеяния волн сравнима по величине с эффективной площадью рассеяния объектов локации [9], поэтому помеха от моря в общем случае может сформировать пачку импульсов, подобную сигнальной. Следовательно, при моделировании необходимо учитывать многомерность как входного полезного сигнала, так и помехи.

Случайный процесс $\vec{X}_{[n]}$ на входе радиолокационного приемника представляет собой последовательность случайных составных векторов (1) $\vec{X}_{[n]}$ ($n = 1, \dots, N$).

Так как состояние системы в момент времени n описывается случайным вектором $\vec{X}_{[n]}$, то входной процесс $\vec{X}_{[n]}$ – векторный случайный процесс с Λ составляющими ($\Lambda = M \times L$). Начало ($n = 1$) и конец ($n = N$) процесса определяются началом и концом автосопровождения объекта соответственно.

Входной процесс $\vec{X}_{[n]}$ можно классифицировать как процесс с непрерывным состоянием (множество возможных значений амплитуд $x_{lm}[n]$ несчетно) и дискретным временем (значения $\vec{X}_{[n]}$ наблюдаем в фиксированные моменты времени: $n=1, \dots, N$)

Закон распределения процесса $\vec{X}_{[n]}$ – закон распределения его сечения для любого значения аргумента n . Так как случайная величина $\vec{X}_{[n]}$, соответствующая сечению в момент n , характеризуется непрерывным состоянием, то закон распределения процесса представляет собой плотность распределения вектора $\vec{X}_{[n]}$. Для моделирования случайного вектора требуется его многомерная плотность распределения и ковариационная матрица. Учитывая, что для вектора $\vec{X}_{[n]}$ известна одномерная плотность вероятности его компонент x_{lm} [10], а также то, что моделирование случайного вектора и случайного процесса, заданного на конечном интервале времени $(0, T)$, в принципе не отличается [11] (дискретные реализации случайных процессов, ограниченных во времени, можно рассматривать как выборочные значения Λ - мерных случайных векторов, где $\Lambda = T/\Delta t$), то моделирование вектора $\vec{X}_{[n]}$ – сводится к моделированию случайной последовательности импульсов

$x_{lm}[n, t_\lambda]$ ($m = 1, \dots, M; l = 1, \dots, L; \lambda = 1, \dots, \Lambda$), где $t_\lambda - t_{\lambda-1} = \Delta t$, $\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} \Delta t_\lambda = T$.

Импульс $x_{lm}[n]$ представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала $s_{lm}[n]$ и помехи $\xi_{lm}[n]$.

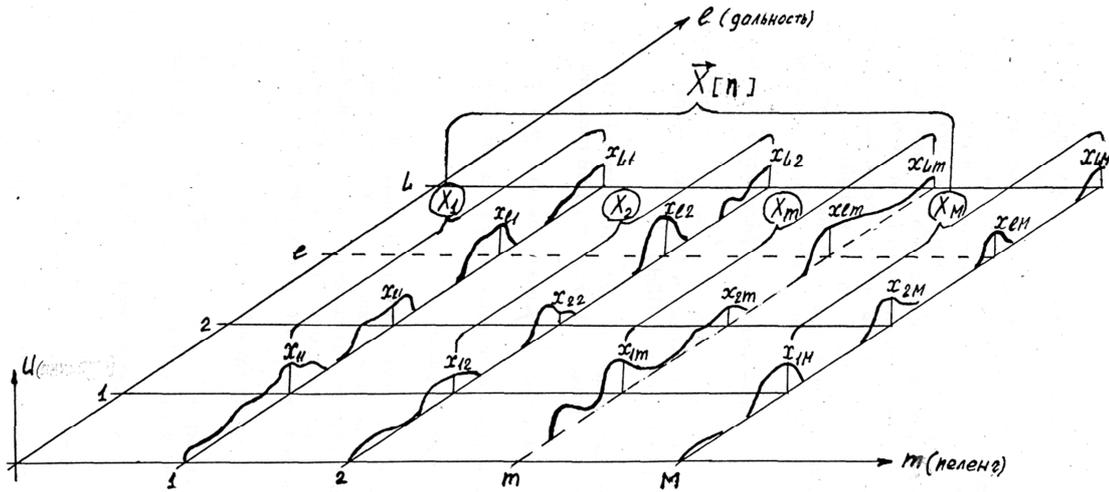


Рис. 1. Вектор \vec{X} и его компоненты в момент времени n

Плотность вероятности для амплитуд смеси полезного сигнала и помехи подчиняется закону Релея-Райса

$$W(\xi) = \frac{\xi}{\sigma_N^2} e^{-\frac{\xi^2 + S^2}{2\sigma_N^2}} I_0\left(\frac{S\xi}{\sigma_N^2}\right),$$

где ξ - амплитуда помехи;
 s - амплитуда сигнала;
 I_0 - функция Бесселя;
 σ_N^2 - дисперсия исходного нормального процесса.

Для моделирования плотности вероятности амплитуды импульса $x_{lm}[n]$ на lm позиции пачки используется специальный метод моделирования случайных величин [11], заключается в том, что закон Релея-Райса можно получить путем преобразования системы двух случайных чисел ξ_{1lm} и ξ_{2lm} в виде

$$X_{lm}[n] = \sqrt{\xi_{1lm}^2[n] + (\xi_{2lm}[n] + S_{lm}[n])^2}, \quad (2)$$

где $\xi_{1lm}[n]$ и $\xi_{2lm}[n]$ - нормально распределенные независимые случайные величины с математическим ожиданием $m=0$ и дисперсией σ_N^2 ;
 S_{lm} - амплитуда полезного сигнала на lm позиции пачки.

Значение S_{lm} определялось из выражения

$$S_{lm} = a_{lm}\sigma_N,$$

где a_{lm} - заданное отношение сигнал-помеха на lm позиции в пачке, определяемое соотношением

$$a_{lm} = a_{oc}g_{lm},$$

где $a_{oc} = \frac{S_0}{\sigma_N}$ - отношение сигнал-помеха в центре пачки.

Нормально распределенное число ξ получалось как сумма нескольких независимых случайных чисел с равномерным распределением.

Сигнал $\vec{X}_{[n]}$ имеет фиксированное число K позиций и огибающую для НРЛС, которая охватывает импульсы $x_{lm}[n]$, расположенные на одной и той же дальности, на разных пеленгах.

$$g_{lm} = \frac{\sin^2 2l3lm\Delta\Pi}{(2l3lm\Delta\Pi)^2},$$

где lm – позиция в пачке, изменяющаяся в пределах

$$lm = -\frac{K-1}{2} \div \frac{K-1}{2};$$

$\Delta\Pi$ - дискретность пеленга.

Моделирование процесса $\vec{X}_{[n]}$ требует разработки специальной программы. Для формирования значений ξ_{1lm} и ξ_{2lm} используются стандартные подпрограммы GAUSS (получение случайных чисел, распределенных по нормальному закону) и RANDU (равномерно распределенные числа).

Для процесса $\vec{X}_{[n]}$, соответствующего помехе, отраженной от моря, принята последовательность векторов $\vec{X}_{[n]}$ ($n = 1, \dots, N$). Компоненты вектора $\vec{X}_{[n]}$ - вектора $X_m[n]$ ($m = 1, \dots, M$), координатами которых являются амплитуды импульсов $x_{lm}[n]$ ($l = 1, \dots, L; m = 1, \dots, M$).

Импульсы помехи с огибающей g_{lm} образуют компоненты $x_{1,m+1}$, $x_{1,m+2}$. Каждый импульс представляет собой аддитивную смесь квазидетерминированной $z_{lm}[n]$ и случайной $\xi_{lm}[n]$ составляющих помехи. Амплитуда импульса имеет плотность вероятности, подчиняющуюся закону Релея-Райса [12] в соответствии с выражением

$$W(\xi) = \frac{\xi}{\sigma_N^2} e^{-\frac{\xi^2+z^2}{2\sigma_N^2}} I_0\left(\frac{z\xi}{\sigma_N^2}\right).$$

Моделирование закона проводится по тому же методу, что и для полезного сигнала, в соответствии с выражением

$$X_{lm}[n] = \sqrt{\xi_{1lm}^2[n] + (\xi_{2lm}[n] + z_{lm}[n])^2}$$

где $\xi_{1lm}[n]$ и $\xi_{2lm}[n]$ - те же величины, что и входящие в выражение (2).

Значение $z_{lm}[n]$ определяется по формуле

$$z_{lm} = a_{0n} g_{lm} \sigma_N,$$

где a_{0n} – заданное отношение квазидетерминированной составляющей помехи к ее случайной составляющей в центре пачки.

В отличие от полезного сигнала, амплитуда импульсов которых записывается в заранее известные ячейки матрицы, пачки импульсов райсовской помехи записываются в ячейки матрицы, выбранные случайным образом с вероятностью P . В остальные ячейки (кроме отведенных для полезного сигнала) записывается помеха, плотность вероятности амплитуд которой подчиняется закону Релея

$$W(\xi) = \frac{\xi}{\sigma_N^2} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma_N^2}}.$$

Вышеприведенная модель помехи соответствует отражениям от моря, поступающим на вход приемника из областей морской поверхности, расположенные на малых расстояниях: 0÷5 (миль). На больших расстояниях на вход приемника может поступать помеха от моря,

плотность вероятности амплитуд $x_{lm}[n]$ которой подчиняется закону Релея с соответствующей межпериодной автокорреляционной функцией $R(\tau)$ (период – время между следованием импульсов $x_{1,m}$ и $x_{1,m+1}$, равный периоду зондирования РЛС).

Экспериментальные исследования в 3-см диапазоне радиоволн показывают [10], что функцию $R(\tau)$ можно аппроксимировать выражением [11]

$$r(\tau) = \sigma^2 e^{-2\omega|\tau|}$$

или в дискретном виде

$$r(m) = \sigma^2 e^{-2\omega|m|}, \quad (2)$$

где σ^2 – дисперсия релеевского процесса;

ω – параметр экспоненты.

Для моделирования процесса с корреляционной функцией (3) применяются разностные уравнения, которые приводят к алгоритмам, не имеющим методических погрешностей и сводящимся к простым рекуррентным соотношениям.

Моделирование заключается в следующем [11].

Дискретные реализации релеевского процесса формируются в соответствии с выражением

$$x_{lm}[n] = \sqrt{\xi_{1lm}^2[n] + \xi_{2lm}^2[n]}$$

Нормально распределенные случайные величины ξ_{1lm} и ξ_{2lm} с коэффициентом корреляции

$$r_0[m] = \sqrt{r[m]}$$

определяются по алгоритму

$$\xi[m] = \sigma \sqrt{1 - \rho^2} x[m] + \rho \xi[m-1],$$

где $\rho = e^{-\omega \varepsilon}$;

ε – шаг дискретизации, равный периоду зондирования РЛС;

$x[m]$ – последовательность независимых нормальных случайных чисел с параметрами: $m_x = 0$, $\sigma_N^2 = 1$.

На вход приемника может поступать также хаотическая помеха, создаваемая работающими источниками излучения. Параметры помехи – скважность и амплитуда – случайные величины. Для моделирования помехи разрабатывается программа, реализующая формирование помехи вида

$$W_{x_{lm}} = (1-P)W_p0 + P_x W_N,$$

где W_p и W_N – плотность вероятности амплитуд соответственно релеевского и нормального процессов с одинаковым значением σ_N ;

P_x – вероятность появления помехи.

Таким образом, в данной работе проведены исследование и разработка имитационной модели процесса на входе радиолокационного приемника РЛС. В дальнейшем требуется разработка соответствующего программного обеспечения и создание интерактивной среды имитационного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нефедов С.И.* Разработка программного обеспечения имитационного моделирования эффективности применения технических решений РЛС/ С.И. Нефедов, Ю.С. Нефедова, Г.П. Лукин, Е.Ю. Кватко, А.А. Каранкевич// Электронное научно-техническое издание. НИИ РЭТ МГТУ им.Н.Э. Баумана. – март 2012. – №.03
2. *В.В.Леонтьев.* Моделирование экзосигналов судовых радиолокационных станций./ В.В. Леонтьев, В.А. Виноградов, В.В. Паутов// Судостроение (С.-Петербург) –1997. – №.5 – С. 52-54, 103, 104. – Рус.;ред.англ.
3. *Бакланов В.П.* Цифровое моделирование случайных процессов/ В.П. Бакланов// – М.: СФЙНС-СПРЕСС, 2002. – Вып.3 – С. 88 е.: ил

4. Калениченко С.П., Коновалов А.А., Михайлов В.Н., Нгуен Хьу Тхань. Имитатор радиолокационных сигналов микроволнового диапазона. – Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», сер. «Радиотехника», 2004, вып.1, с. 28-33.
5. Калениченко С.П., Михайлов В.Н., Нгуен Хьу Тхань. Моделирование отражений от морской поверхности в сантиметровом диапазоне электромагнитных волн. Изв. вузов России, сер. «Радиотехника», 2004, вып.3, с. 19-27.
6. Цифровая обработка сигналов/ А.Б. Серженко СПб.: Питер, 2003. – 604.
7. Long M.W. Radar Reflectivity of land and Sea. 3-d Edition. Neew York: Artech House, 2000. 560 pp.
8. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400с.
9. Разработка технических предложений по развитию систем и техники связи и электронавигации. Раздел Г. Исследование влияния волнения моря на радиолокационные наблюдения. Научно-техн. отчет. – л.: Центральный НИИ морского флота, 1971. – 120 с.
10. Жерлаков А.В., Зимин Н.С., Кононов О.В. Радиолокационные системы предупреждения столкновений судов. – Л.: Судостроение, 1984. – 200 с.
11. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радтоэлектронике. – М.: Сов. радио, 1971. – 328 с.
12. Тверской Г.Н., Терентьев Г.К., Харченко И.Л. Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. – Л.: Судостроение, 1973. – 224 с.

Воробей В.І.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НА ВХОДІ ПРИЙМАЧА РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

У статті наводиться дослідження і розробка імітаційної моделі процесу на вході радіолокаційного приймача для вирішення завдань супроводу об'єктів в засобах автоматичної радіолокаційної прокладки навігаційної радіолокаційної станції.

Ключові слова: радіолокація, моделювання.

Vorobei V.

MODELING OF THE PROCESS AT THE INPUT OF THE RADAR RECEIVER

The article presents the research and development of a simulation model of the process at the input of the radar receiver for solving problems of tracking objects in automatic radar plotting aids.

Keywords: radar, modeling

УДК 621.396:656.61.052

Баранов Г.Л., Тихонов І.В., Прохоренко О.М.

ПОЛІЕРГАТИЧНЕ ГАРАНТУВАННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ РУХОМ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Розроблено методологічні засади поліергатичного гарантування безпеки руху та ефективності функціонування систем навігації та управління рухом високошвидкісних транспортних засобів для забезпечення безпеки судноплавства. Методологія дозволяє визначити структурно-функціональний розподіл наявних засобів навігаційних систем та комплексів оптимального траєкторного управління для своєчасного зменшення ризиків, які виникають у локальній зоні судноводіння.