

систолическими принципами организации ортогональных преобразований сигналов позволяет обеспечивать не только высокую скорость обработки данных, но и разрабатывать вычислительные устройства, обладающие свойствами устойчивости к последовательностям отказов и сбоев.

Литература

1. Червяков Н. И., Калмыков И. А., Галкина В. А., Щелкунова Ю. О., Шилов А. А. Элементы компьютерной математики и нейроинформатики / под ред. Н. И. Червякова. М.: Физматлит, 2003. 216 с.
2. Калмыков И. А. Математические модели нейросетевых отказоустойчивых вычислительных средств, функционирующих в полиномиальной системе классов вычетов / под ред. Н. И. Червякова. М.: Физматлит, 2005. 276 с.
3. Вариченко Л. В. Абстрактные алгебраические системы и цифровая обработка сигналов. Киев: Наукова думка, 1986. 247 с.
4. Калмыков И. А., Червяков Н. И., Щелкунова Ю. О., Бережной В. В. Математическая модель нейронных сетей для исследования ортогональных преобразований в расширенных полях Галуа // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2003. № 6. С. 61–68.
5. Калмыков И. А., Зиновьев А. В., Емарлукова Я. В. Высокоскоростные систолические отказоустойчивые процессоры цифровой обработки сигналов для инфотелекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2009. № 2. С. 31–37.
6. Калмыков И. А., Хайватов А. Б. Математическая модель отказоустойчивых вычислительных средств, функционирующих в полиномиальной системе классов вычетов // Инфокоммуникационные технологии. 2007. № 3. С. 39–42.

УДК 621.371.3: 621.396.96

**Пашинцев Владимир Петрович, Чипига Александр Федорович,
Лапина Мария Анатольевна, Хохлов Илья Евгеньевич**

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ В РАДИОКАНАЛАХ С ЗАМИРАНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВРАЩЕНИЙ

В статье разработан алгоритм расчета зависимости вероятности ошибки при разнесенном приеме от отношения сигнал/шум и коэффициента корреляции релейских замираний сигналов при большой кратности разнесения.

Ключевые слова: алгоритм расчета, вероятность ошибки, радиоканал, разнесенный некогерентный прием, корреляция замираний.

**Pashincev Vladimir Petrovich, Chipiga Alexander Fedorovich,
Lapina Maria Anatolevna, Hohlov Ilya Evgenievich**

THE ALGORITHM FOR CALCULATING THE PROBABILITY OF ERROR IN FADING RADIO CHANNELS USING THE METHOD OF ROTATION

The algorithm of calculating the dependence of the error probability of diversity reception of the signal-to-noise ratio and correlation coefficient rayleigh fading signals at high multiplicity of spacing.

Key words: algorithm, the probability of errors, radio channel, spaced incoherent reception, fading correlation.

В статье [1] разработана методика оценки помехоустойчивости систем связи при n -кратном разнесенном приеме сигналов при коррелированных релейских замираниях. В результате получены зависимости вероятности ошибочного приема от отношения сигнал/шум и коэффициента корреляции замираний в $n \geq 4$ ветвях разнесения. Однако полученные зависимости ограничены диапазоном изменения коэффициента корреляции замираний от 0,05 до 0,09, в то время как реальные значения этого коэффициента могут находиться в интервале от 0 до 1. Этот недостаток обусловлен тем, что для расчетов и графического отображения результатов использовался пакет MATLAB. Поэтому целесообразно разработать алгоритм, позволяющий получать указанные зависимости в требуемом интервале $[0;1]$. В работе [2] обоснована возможность разработки этого алгоритма на основе численного метода вращений.

Целью статьи является разработка алгоритма расчета вероятности ошибочного приема в зависимости от отношения сигнал/шум и коэффициента корреляции релейских замираний в $n \geq 4$ ветвях разнесения на основе метода вращений.

В [3] разработана методика оценки помехоустойчивости разнесенного некогерентного (НК) приема с квадратичным сложением сигналов, подверженных релеевским замираниям. Выражение для вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ при произвольном числе n ($n \geq 4$) ветвей разнесения имеет вид:

$$P_{\text{ош}} = \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k^{2(n-1)}}{\lambda_k + 2} \prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^n \frac{\lambda_p + 1}{(\lambda_k + \lambda_p)(\lambda_k + \lambda_p + \lambda_k \lambda_p)}, \quad (1)$$

где λ_k – собственные значения корреляционной матрицы KQ, определяемые из решения уравнения

$$\det(KQ - \lambda I) = 0, \quad (2)$$

где I – единичная диагональная матрица.

Корреляционную матрицу KQ можно записать следующим образом:

$$KQ = h^{-2} \begin{vmatrix} 1 & |R_1| & |R_2| & \dots & |R_{n-1}| \\ |R_1| & 1 & |R_1| & \dots & |R_{n-2}| \\ |R_2| & |R_1| & 1 & \dots & |R_{n-3}| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ |R_{n-1}| & |R_{n-2}| & |R_{n-3}| & \dots & 1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $|R_1|$, $|R_2|$, ..., $|R_n|$ – модули комплексных коэффициентов корреляции между соответствующими ветвями разнесения в случае НК приема.

В результате преобразований матрицы (3), в [1] получено выражение для матрицы KQ при линейном пространственно разнесенном приеме сигналов на n антенн:

$$KQ = h^{-2} \begin{vmatrix} 1 & R & R^4 & \dots & R^{(n-1)^2} \\ R & 1 & R & \dots & R^{(n-2)^2} \\ R^4 & R & 1 & \dots & R^{(n-3)^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R^{(n-1)^2} & R^{(n-2)^2} & R^{(n-3)^2} & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Уравнение (2) можно решить, составив характеристическое уравнение, но при произвольном числе n ($n \geq 4$) ветвей разнесения его решение является трудоемкой задачей, так как придется решать уравнение высокого порядка. Решение этой задачи с использованием ЭВМ обладает высокой вычислительной сложностью.

В [2] обоснована возможность нахождения всех собственных значений без решения характеристического уравнения (2) путем вычисления собственных значений матрицы (4) с помощью численного метода вращения, который подходит для программирования алгоритма оценки помехоустойчивости разнесенного некогерентного приема сигналов, подверженных релеевским замираниям, так как он является итерационным.

Для его реализации разработан алгоритм, представляющий собой связанные функции, выполняющие определенные задачи.

Программная реализация алгоритма позволяет отображать кривые, характеризующиеся следующими величинами: количество антенн (N), коэффициент корреляции замираний (R), наименьшее и наибольшее значения отношения сигнал/шум (start , finish) на входе приемника, которые вводятся пользователем. Допускается изменение точности построения кривой пользователем путем изменения шага вычислений (step).

На рис. 1 представлен алгоритм главного модуля программы, отвечающий за проведение расчетов на заданном диапазоне значений сигнал / шум.

На представленной обобщенной схеме используется функция Function (рис. 2), позволяющая выводить график зависимости вероятности ошибки при приеме сигнала от величины отношения сигнал/шум в окно приложения.

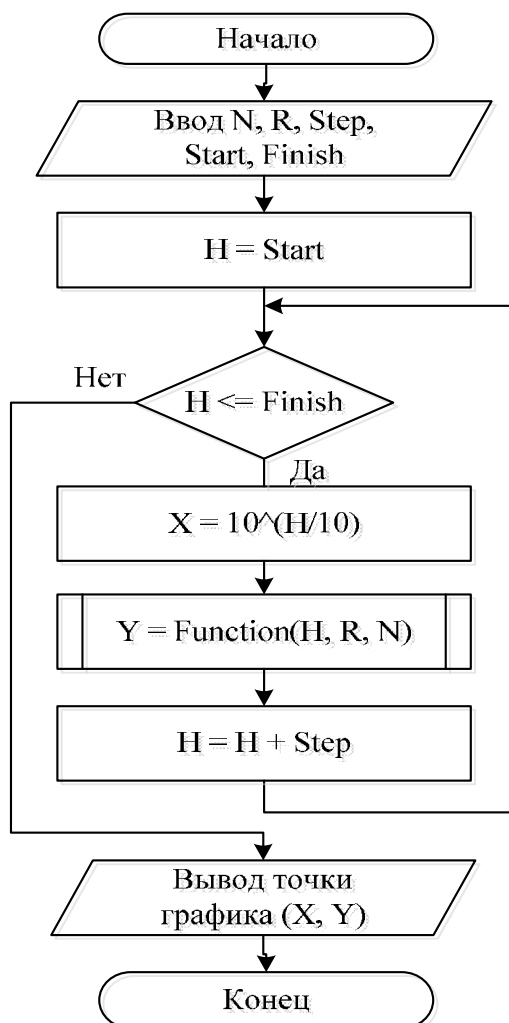


Рис. 1. Обобщенная схема главного модуля программы

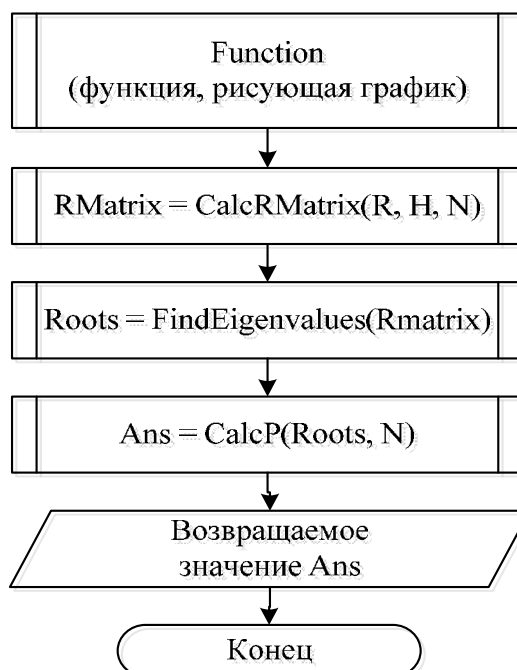


Рис. 2. Обобщенная схема функции Function

На рис. 3 представлена обобщенная схема функции CalcRMatrix вычисляющая корреляционную матрицу (4).

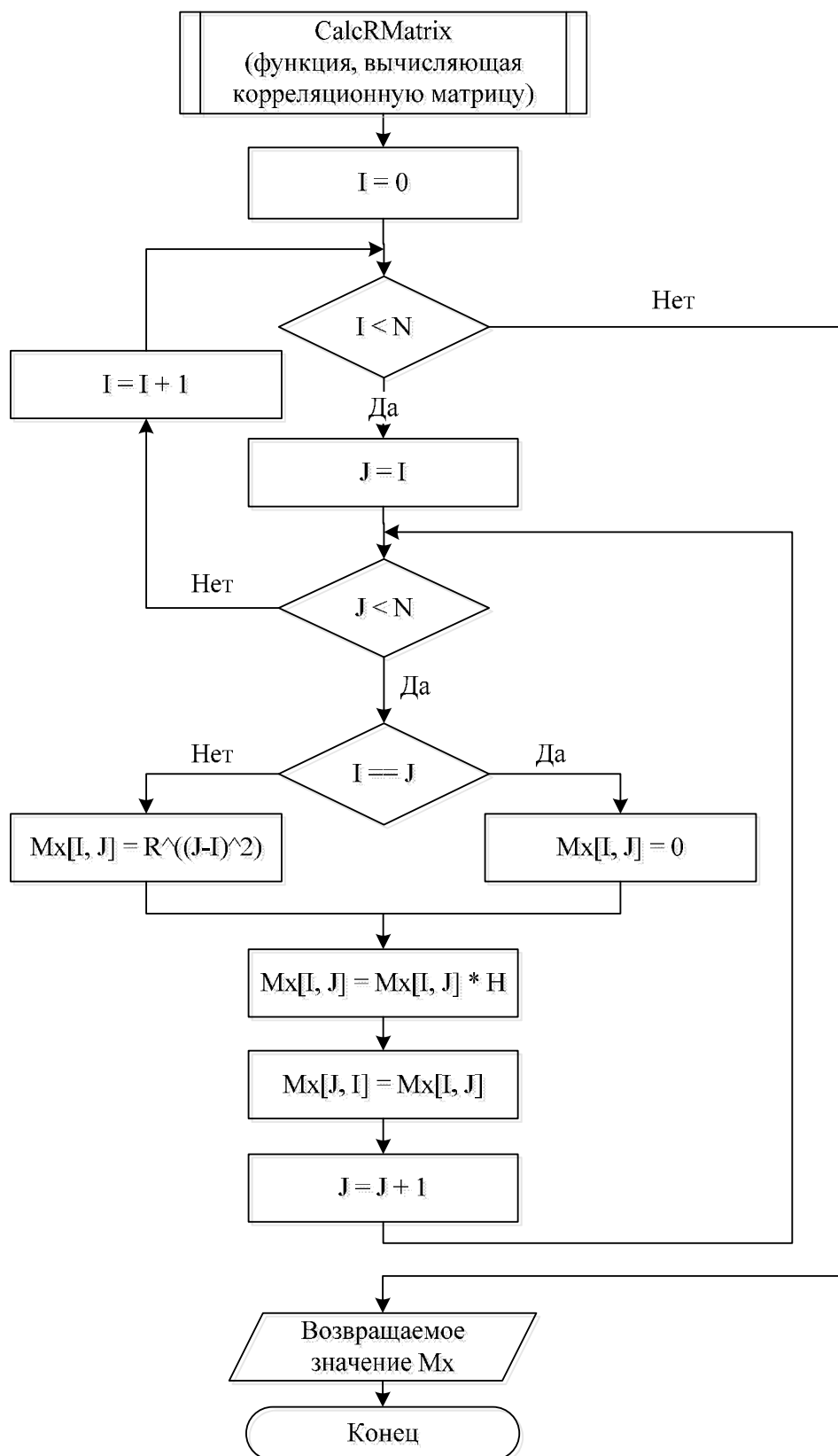


Рис. 3. Обобщенная схема функции CalcRMatrix

Функция FindEigenvalues, вычисляющая собственные значения матрицы (4) итерационным методом вращений, представлена на рис. 4.

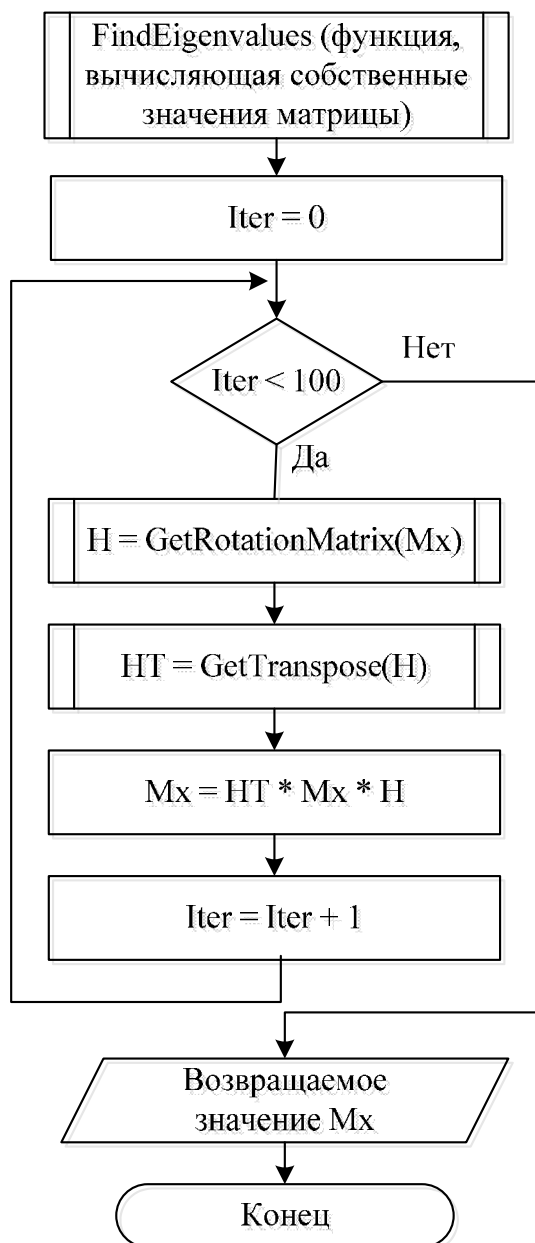


Рис. 4. Обобщенная схема функции FindEigenvalues

Функция GetRotationMatrix(M_x), используемая в обобщенной схеме (рис. 4), находит матрицу поворота. Она состоит из цепочки ортогональных преобразований подобия матрицы. Каждое преобразование – плоский поворот с целью обнуления одного из недиагональных элементов матрицы. Функция GetTransmonse (H) производит транспонирование матрицы.

Последовательные преобразования согласно [4] не сохраняют уже установленные нулевые элементы, но вместе с тем недиагональные элементы становятся меньше и меньше до тех пор, пока матрица не станет диагональной с точностью до машинного нуля. Обычно хватает ста итераций для получения близких к нулю значений вне диагонали. Накопление в процессе преобразований произведения трансформированных матриц дает матрицу собственных векторов, в то время как диагональные элементы являются собственными значениями.

Алгоритм вычисления вероятности ошибки (1) при произвольном числе ветвей разнесения приведен на рис. 5.

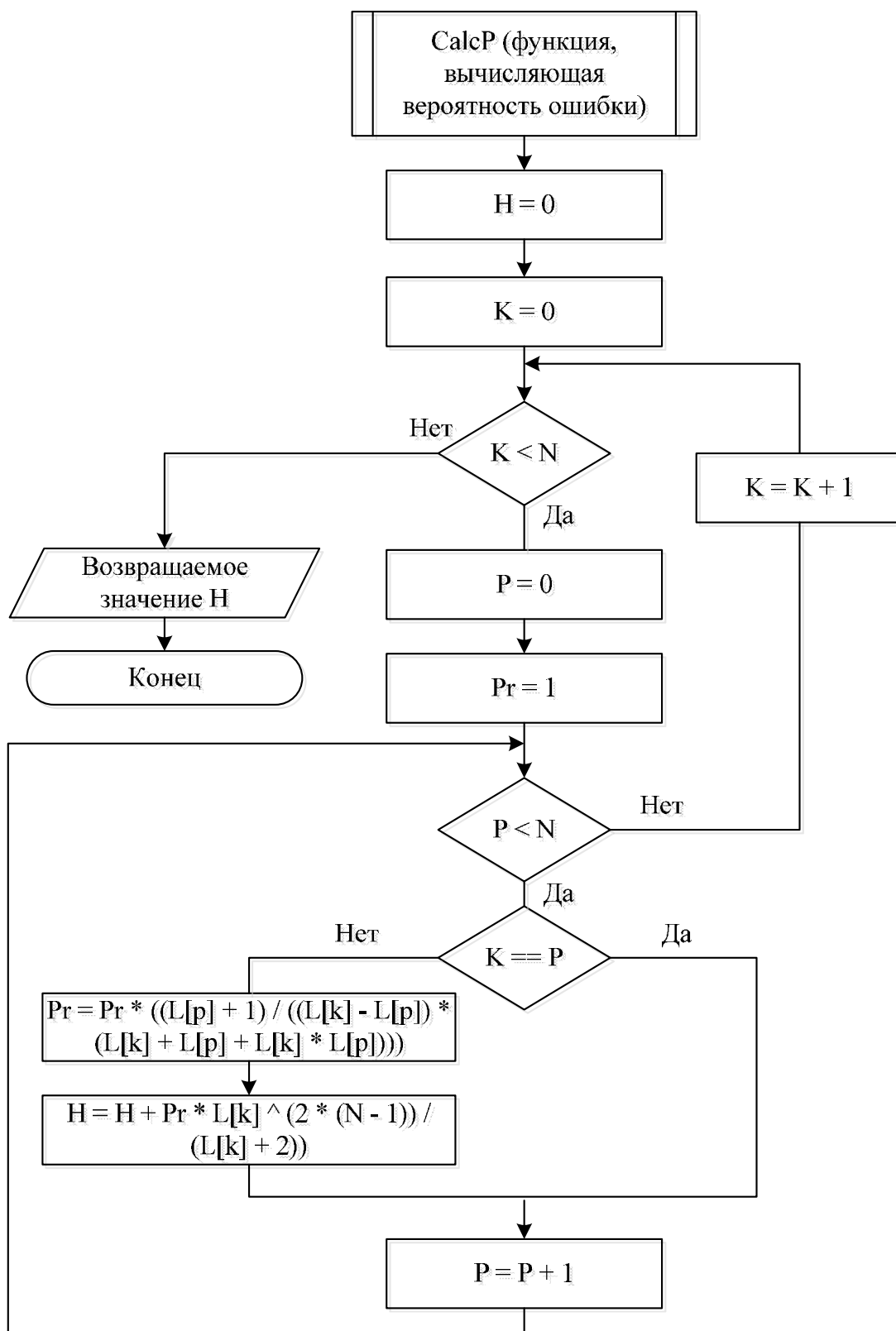


Рис. 5. Обобщенная схема функции CalcP

Разработанный программный продукт позволяет графически отображать полученную зависимость. Интерфейс программной реализации алгоритма расчета значения вероятности ошибки в радиоканалах с релейскими замираниями с помощью метода вращений приведен на рис. 6.

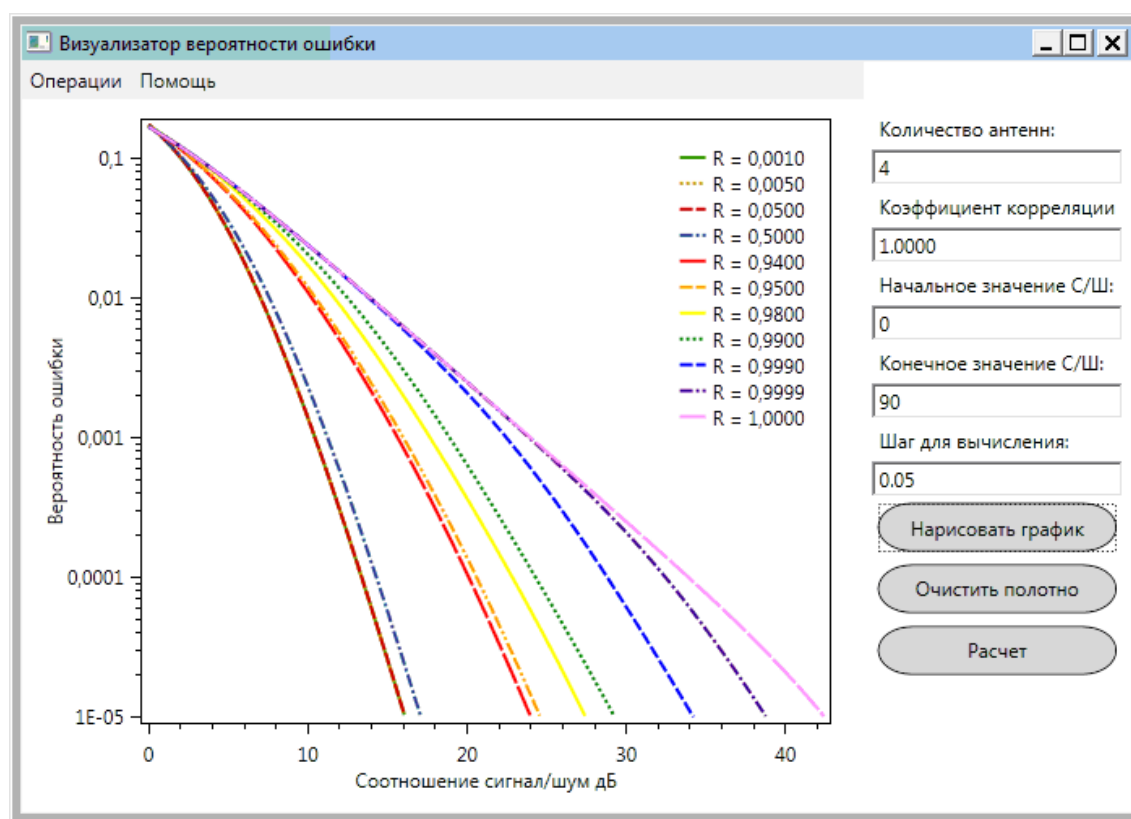


Рис. 6. Интерфейс программного продукта

Анализ графиков (рис. 6) показывает, что кривые, соответствующие значениям коэффициентов корреляции замираний $R = [0,05; 0,5; 0,94; 0,95; 0,98; 0,99]$, в точности соответствуют известным результатам, приведенным в [1]. График кривой, соответствующий наименьшему коэффициенту корреляции $R = 0,001$, практически совпадает с известным графиком при $R = 0,05$. Графики, соответствующие наибольшим коэффициентам корреляции $R = [0,999; 0,9999; 1]$, существенно отличаются от известного графика при $R = 0,99$.

Таким образом, разработан алгоритм расчета зависимости вероятности ошибочного приема от отношения сигнал/шум и коэффициента корреляции релейских замираний в $n \geq 4$ ветвях разнесения на основе метода вращений, приведенный на рисунках 1–5. Данный алгоритм обеспечивает такую же точность расчета, как и известный в [1], но в более широком диапазоне значений коэффициента корреляции; таким образом, алгоритм обеспечивает достоверность полученных результатов.

На базе представленного алгоритма возможно решение ряда практических задач, в частности, определение графической или табличной зависимости допустимого отношения сигнал/шум на входе приемника от коэффициента корреляции замираний в ветвях разнесения, при которых обеспечивается допустимое значение вероятности ошибочного приема сигналов в радиоканалах с релейскими замираниями.

Литература

1. Киселев В. Н., Еремин А. М., Манаенко С. С., Сеноковсова А. В. Методика оценки помехоустойчивости систем тропосферной связи при коррелированных релейских замираниях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. № 6. С. 21–23.
2. Пашинцев В. П., Чипига А. Ф., Лапина М. А., Малсугенов О. В., Хохлов И. Е. Применение метода вращений для оценки помехоустойчивости разнесенного приема сигналов // Современная наука и инновации. 2013. № 1.
3. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. М.: Советское радио, 1971. 408 с.
4. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра. М.: Наука, 1978. 304 с.