4. Яремчук Ю.Є. Оцінювання обчислювальної складності алгоритмів прискореного обчислення елементів рекурентних послідовностей / Ю.Є. Яремчук // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2012. – №12 (183), Ч. 2. – С. 113-121.

5. Menezes A.J., van Oorschot P.C., Vanstone S.A. Handbook of Applied Cryptography. – CRC Press, 2001. – 816 p.

6. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ, том 2. Получисленные алгоритмы / Д. Кнут. – М.: Вильямс, 2004. – 832 с.

УДК 621.396.662.072.078

Сайко В.Г., д.т.н. ; **Дакова Л.В.** асп.; **Бондарчук А.П.,** к.т.н.
(Государственный университет информационно-коммуникационных технологий)

РЕКУРЕНТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАМИРАНИЙ МНОГОЛУЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИЩЕННЫХ РАДИОСИСТЕМ

Сайко В.Г., Дакова Л.В., Бондарчук А.П. Рекурентний метод визначення глибини завмирань багатопроменевих сигналів для захищених радіосистем. Запропоновано новий метод визначення глибини завмирань багатопроменевих сигналів мереж рухомого радіозв'язку, що відрізняється простотою технічної реалізації і дозволяє зменшити середньоквадратичну похибку і варіабельність оцінки в середньому на 9-14%.
Ключові слова: ЗАВМИРАННЯ СИГНАЛІВ, ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/МУМ

Сайко В.Г., Дакова Л.В., Бондарчук А.П. Рекуррентный метод определения глубины замираний многолучевых сигналов для защищенных радиосистем. Предложен новый метод определения глубины замираний многолучевых сигналов сетей подвижной радиосвязи, отличающийся простотой технической реализации и позволяющий уменьшить среднеквадратическую погрешность и вариабельность оценки в среднем на 9-14 %.
Ключевые слова: ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ, ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ

Saiko V.H., Dakova L.V., Bondarchuk A.P. Recursive method for determining the depth of fading multipath signals for secure radio communications. A new method for determining the depth of fading multipath signals of mobile radio technology which is easy to implement and allows to reduce the mean squared error and variability of estimates by an average of 9-14%.
Keywords:: FADING SIGNALS, SIGNAL / NOISE RATIO

В системах мобильной связи нового поколения ряд задач обнаружения и различения многолучевых сигналов на фоне помех с априорно неизвестными статистическими характеристиками можно успешно решить с помощью систем, адаптирующихся к наиболее информативным параметрам **статистик второго порядка** принимаемого сигнала с замираниями. К таким параметрам относятся, например, среднее число пересечений одного или нескольких относительных уровней анализа за фиксированное время, распределение длительностей выбросов за уровень и пауз между ними, распределение времени пребывания сигнала в заданных границах. Полезной может оказаться информация о законе распределения интервала времени между произвольным моментом и первым пересечением сигналом нулевого уровня, о среднем интервале между экстремумами сигнала [1]. Самыми изученными параметрами **статистик второго порядка** являются их средние длительности за уровень и, отчасти, дисперсии длительностей, а также начальные участки плотностей распределения длительностей выбросов. Ввиду сложности строго решения ряда задач в области теории выбросов случайных процессов, полезными оказываются приближенные результаты, которые удается довести до инженерных приложений [2].

Постановка задачи. Проведенный анализ методов определения характеристик замираний сигнала из-за многолучевости (канальных статистических параметров второго порядка и глубины замираний) показал, что при непараметрической априорной неопределенности наилучшим методом анализа сигналов с замираниями с точки зрения теоретического и практического применения является метод, основанный на разбиении исходной реализации на «квазистационарные участки» с последующей их аппроксимацией. Построенный на этом принципе алгоритм [3] с использованием статистики Кендалла имеет высокую эффективность, однако отличается более высокими вычислительными затратами по сравнению с методом скользящего среднего и ряда других. Полученная оценка является ступенчатой или ломаной функцией.

Следовательно, если функцию сигнала с замираниями представить, как составную модель полиномов низкой степени с неизвестными коэффициентами, то оценку этих коэффициентов можно получить с использованием метода наименьших квадратов. Однако интервалы аппроксимации априорно неизвестны. В связи с этим возникают погрешности аппроксимации, возникающие при неправильном выборе степени аппроксимирующего полинома. Поэтому, в ряде задач требуется дополнительная аппроксимация с целью получения непрерывной функции оценки измеряемого процесса.

Обзорный анализ подходов к решению этой задачи показал, что для определения значений уровня замираний в реализации многолучевого сигнала используются методы и алгоритмы, основанные на получении оценки функции полезной составляющей сигнала с замираниями с последующим их вычитанием из реализации исследуемого сигнала и установки порового значения. Обнаружение значений сигнала с замираниями, основанные на предварительной оценке его полезной составляющей, снижает эффективность обнаружения значений замирающего сигнала из-за погрешности в оценке полезной составляющей процесса, которая, в свою очередь, зависит от наличия участков с замираниями. С другой стороны, использование оптимального обнаружителя на основе адаптации к изменяющимся внешним условиям, приводят к значительному его усложнению. В связи с этим, для более простой реализации алгоритма предлагаемого рекуррентного метода использовался цифровой программный обнаружитель, практическая реализация которого достаточна проста.

Описание предложенного метода. Входная реализация для данного обнаружителя преобразуется в последовательность нулей и единиц в результате сравнения с некоторым заданным пороговым значением lo. При превышении порогового значения принимается значение единица, в противном случае –нуль. Сравнения суммы полученных нулей и единиц на некотором заданном интервале, который определяется из вероятности заданной ошибки первого рода (вероятности ложной тревоги) α, с порогом С принимается решение о наличии, либо отсутствии сигнала на анализируемом интервале, т.е.

$$У_{К1} = \sum_{i=1}^{N_{эф}-1} d_{k-j} \geq C, \qquad \textbf{(1)}$$

где $N_{эф} << N$ – эффективное число накапливаемых импульсов.

Начало наличия полезного сигнала фиксируется по наличию указанного условия. Как показано в [4], данный обнаружитель является асимптотически оптимальным, сохраняя свою работоспособность и при наличии корреляции между отсчётами в исходной выборке.

<u>Следует отметить, что особенностью применяемого обнаружения является возможность фиксировать начало и конец функции полезного сигнала (участки замираний сигнала по математическому ожиданию).</u> Значение $N_{эф}$ (или значение K) при использовании критерия Неймана-Пирсона определяется как величина обратно пропорциональная вероятности ошибки первого рода (ложной тревоги), т.е. K=1/α (K – целое число) при условии, что отсчеты независимые и помеха является гауссовой. Таким образом, с помощью данного обнаружителя при заданном значении α определяются участки исходной реализации, в которых содержится интервалы замирания и стационарности многолучевого сигнала после ранее проведенной аппроксимации, т.е. можно определить среднюю длительность замираний AFD [5]. Аппроксимация участка замирания осуществляется полиномом второй степени по

методу наименьших квадратов, что позволяет определить среднее значение параметра ***Umin*** при расчете глубины замирания сигнала.

Кроме того, применение рекуррентного метода позволяет подойти к решению задачи выбора степени аппроксимации полинома для определения среднего значения максимального уровня сигнала ***Umax*** при расчете глубины замираний сигнал с несколько других позиций, чем рассмотренные в [6]. Так как применение полинома низкой степени приводит к затягиванию оценки выделяемого процесса, а высокой степени – к значительной вариабельности оценки сигнала, предлагается выбирать степень полинома исходя из возможности получения непрерывной оценки функции полезного сигнала за счет последующего сопряжения отдельных участков аппроксимации с минимальной погрешностью и вариабельностью. Аппроксимирующий полином можно записать в следующем виде [7]:

$$Z(t)=\alpha_0+\alpha_1+\alpha_2 t^2. \qquad \textbf{(2)}$$

Для упрощения дальнейших вычислений перейдем к независимым ортогональным переменным, что позволяет значительно уменьшить объем вычислений:

$$Z(t)=\gamma_0\,\alpha_{0T}(t)+\gamma_1\,\alpha_{1T}(t)+\gamma_2\,\alpha_{2T}(t). \qquad \textbf{(3)}$$

Оценками коэффициентов γ_0, γ_1, γ_2 в выражении (3) по методу наименьших квадратов, являются следующие величины [8]:

$$\gamma_к=\sum_{i=1}^{T} У_{\varphi КТ}(t)\Big/\sum_{i=1}^{T} У_{\varphi^2 КТ}(t). \qquad \textbf{(4)}$$

где T – интервал аппроксимации, $\varphi_{от}(t)=1$, $\varphi_{im}(t)=t-(T+1)/2$; $\varphi_{2T}(t)=t^2-(T+1)t+(T+1)(T+2)/6$, Y_t – значение исходного дискретного сигнала.

Алгоритм, реализующий метод. Исходная реализация результатов измерений, предварительно занесенная в запоминающее устройство, проверяется с помощью обнаружителя на наличие участков замираний сигнала, определение которых в случае их наличия, определяет интервал аппроксимации, т.е.

$$F\{Y(t),\alpha\}\to T\ , \qquad \textbf{(5)}$$

где $F\{S\}$ – оператор обнаружения интервала замираний сигнала при заданном значении вероятности ошибки первого рода (вероятность ложной тревоги) α, T – интервал аппроксимации результатов измерений. В случае наличия участка замирания сигнала, производиться его полиномиальная аппроксимация по методу наименьших квадратов, т.е.

$$\overline{X}_1(t)=Q\{Y(t),T\}, \qquad \textbf{(6)}$$

где $Q\{S\}$ – оператор полиномиальной аппроксимации.

При этом соответствие полученной оценки $\overline{X}_1(t)$ истинному значению $X(t)$ проверяется вновь обнаружителем на наличие участка замирания сигнала, определяемого значением ошибки первого рода (вероятности ложной тревоги) α в разностном процессе: после вычитания полученной оценки $\overline{X}_1(t)$ из исходной реальности $Y(t)$, которая записана в запоминающем устройстве:

$$F\{Y_t(t),\alpha\}\to T1,\dots T_k\ ,\qquad где\ Y1(t)=Y(t)-\overline{X}_1(t). \qquad \textbf{(7)}$$

Если обнаружитель определяет наличие участков замирания сигнала в разности процессе, то эти участки подвергаются повторной аппроксимации; полученные при этом оценки суммируются с первоначальной оценкой $\overline{X}_1(t)$. Данный итерационный процесс будет продолжаться до тех пор, пока в разностном процессе $Yn(t)=Y(t)-\overline{X}_k(t)$ будут определяться участки участка замирания сигнала обнаружителем при заданном значении α. Оценкой выделенного сигнала ***U min*** будет являться сумма всех оценок, полученных на каждом шаге итерации, т.е**. Y1+Y2+Y3+….+Yn,** а ***Umax*** -- :

$$\overline{X}\ \ (t)=\overline{X}_1(t)+\overline{X}_2(t)+\cdots+\overline{X}_к(t)\ . \qquad \textbf{(8)}$$

Полученная оценка полезной составляющей содержит в ряде случаев разрывы, которые появляются в результате суммирования оценок функции полезного сигнала на отдельных этапах. Наличие разрывов приводит к значительному возрастанию погрешности выделения полезной составляющей, т.е. определения средних значений ***U min*** и ***Umax.*** В связи с этим рассмотрена возможность устранения точек разрыва полученной оценки полезного сигнала, которая повысит точность и гладкость оценки полезной составляющей. Устранение полученных разрывов, иначе говоря, сопряжение соседних отрезков аппроксимаци производится следующим способом. Для этого в точке разрыва, по обе стороны от неё, продолжается значение аппроксимирующего полинома правого и левого на интервал. В результате суммирования полученных произведений производится соединение обоих аппроксимирующих полиномов кривой третьего порядка, что легко доказывается аналитически. Результаты имитационного моделирования в среде MatLab показали, что использование разработанного метода позволяет уменьшить среднеквадратическую погрешность и вариабельность оценки глубины замираний многолучевых сигналов в среднем на 9-14 %.

Выводы. 1. Разработанный рекуррентный метод позволяет повысить точность определения глубины замираний сигналов с замираниями по сравнению с обычной полиномиальной аппроксимацией по методу наименьших квадратов, если априорно не известна степень аппроксимирующего полинома. Его использование позволяет существенно снизить погрешность аппроксимации при неправильном выборе степени аппроксимирующего полинома на интервалах аппроксимации многолучевого сигнала.

2. Оценка эффективности метода показала [9], что потенциальная точность оценки значений выборки сигнала с замираниями возрастает экспоненциально при увеличении длительности выборки сигнала.

3. Показана возможность расчета по предложенной методике законов распределения интервалов пребывания сигнала как вне, так и внутри двух различных границ. Предложенный метод расчета параметров выбросов применим для исследования не только гауссовых процессов, но и релеевских, райсовских и любых других.

Литература

1. Тихонов В.И. Выбросы траекторий случайных процессов / В.И. Тихонов, В.И. Хименко. – М.: Наука, 1987. – 235 с.
2. Брайнина И.С. Методика расчета параметров пересечения нулевого уровня для центрированных стационарных случайных процессов / И.С. Брайнина // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т.7, №4. – С. 55-61.
3. Иванов А.П. Обнаружение нестационарности в записях случайных процессов / А.П. Иванов // Сб. научн. трудов : Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей. – Л.: ВНИИЭП, 1972. – С. 68-72.
4. Лихарев В.А. Цифровые методы и устройства в радиолокации / В.А. Лихарев. – М.: Сов. радио, 1974. – 456 с.
5. Сайко В.Г. Дослідження характеристик завмирань багатопроменевого сигналу на основі подвійного вейвлет-аналізу / В.Г. Сайко // Зв'язок. – 2012. – №4. – С. 35-39.
6. Романенко А.Ф. Вопросы прикладного анализа случайных процессов/ А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. – М.: Сов. радио, 1968. – 256 с.
7. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретичная радиотехника : справочное пособие / А.Н. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 704 с.
8. Куликов Е.И. Прикладной статистический анализ. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 464 с.
9. Сайко В.Г., Очередько М.В. Оцінка ефективності методики визначення параметрів статистик другого порядку сигналів із завмираннями // XI Міжнародна науково-технічна конференція студентства і молоді «Світ інформації та телекомунікацій-2013». Матеріали конференції. – К.: ДУІКТ, 23-26 квітня 2013 р. – С. 118.