



ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ В ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

Филатов Владимир Иванович,
к.т.н., доцент Московского государственного технического
университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, vfil10@mail.ru

Бакулина Елена Леонидовна,
студент Московского государственного технического
университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Бонч-Бруевич Андрей Михайлович,
к.т.н, доцент Московского государственного технического
университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена возможность подавления шумов в рефлектограммах длинных линий на основе применения алгоритмов адаптивной фильтрации и использования технологии экспертных систем для повышения достоверности идентификации подключенных устройств. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие эффективность разработанных методик.

Анализ современного уровня развития и применения метода импульсной рефлектометрии для поиска неисправностей и идентификации подключенных к длинной линии устройств показал, что на результаты измерений значительное влияние оказывает естественный и искусственный шум, а также состояние самой линии. Вследствие этого, полезный сигнал, отражённый от устройств несанкционированного съёма информации и неоднородностей линии, обусловленных наличием поврежденных участков, может значительноискажаться. В результате чего возникают ошибки при обнаружении неисправностей линии и идентификации подключенных к ней устройств.

Цель работы состоит в повышении точности импульсной рефлектометрии длинных линий и достоверности идентификации подключенных устройств. При поведении исследований показано, что положительный эффект может быть достигнут за счет применения алгоритмов адаптивной фильтрации принятого сигнала и использования технологии экспертных систем. Создан экспериментальный стенд из программно-аппаратных средств, позволяющий проводить моделирование задачи идентификации подключенных к линии устройств и исследовать свойства рефлектограмм. Для повышения значения отношения сигнал/шум применялась адаптивная фильтрация принятого сигнала.

Для принятия решения о наличии сигнала и его принадлежности к тому или иному типу была предложена экспертная система. Она состоит из блока формирования априорных данных, базы знаний, блока формирования потока, базы данных, блока входных данных. В работе выделено особое место механизма логического вывода в структуре экспертной системы, который реализует алгоритмы прямого и обратного вывода. Данный механизм может быть представлен последовательностью процедур.

В ходе выполненной работы показана возможность подавления шумов в рефлектограммах длинных линий на основе применения алгоритмов адаптивной фильтрации и использования технологии экспертных систем для повышения достоверности идентификации подключенных устройств.

Результатом исследований стала разработка экспертной системы, которая позволит диагностировать не только наличие неоднородностей в длинной линии, но и проводить идентификацию подключенных устройств.

Ключевые слова: длинные линии; импульсная рефлектометрия; адаптивная фильтрация; экспертные системы; импульсный сигнал.

Для цитирования: Филатов В. И., Бакулина Е. Л., Бонч-Бруевич А. М. Применение адаптивной фильтрации и экспертной системы в импульсной рефлектометрии длинных линий // Науковые технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 2. С. 32-38.

Одним из основных недостатков современных методов импульсной рефлектометрии для поиска неисправностей и идентификации подключенных к длинной линии устройств является отсутствие возможности избегать влияния естественных и искусственных помех [1]. Данный факт подтверждается значительными искажениями сигналов, отражённый от устройств несанкционированного съёма информации, что затрудняет процедуру обнаружения и идентификации.

Для снижения влияния шумов в простейшем случае наиболее применимо адаптивное устройство, которое содержит программируемый фильтр обработки данных и блок, реализующий алгоритм адаптации, настраивающий коэффициенты программируемого фильтра. При этом могут использоваться фильтры с конечной и бесконечной импульсной характеристикой [2].

Для решения поставленной задачи выбран градиентный алгоритм адаптивной обработки сигналов с использованием критерия минимума среднеквадратичного отклонения. Применение данного алгоритма оправдано, так как он прост в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов. В данном случае, требования к скорости сходимости алгоритма не являются существенными.

Для проведения математического моделирования использовался алгоритм NLMS, а также информационные возможности системы MATLAB и средой моделирования Simulink. Эта система располагает всеми необходимыми средствами для проведения моделирования адаптивной фильтрации. Кроме того, задействованы возможности библиотеки Signal Processing Blockset. Цифровая фильтрация выполнялась с использованием критерия минимума среднеквадратичного отклонения (Least Mean Squares, LMS), основанного на поиске минимума целевой функции методом наискорейшего спуска.

Стандартный LMS — алгоритм выполняет следующие операции:

- вычисляет выходной сигнал $y'(n)$ адаптивного фильтра;
- вычисляет сигнал ошибки $e(n)$, используя следующее выражение:

$$e(n) = y(n) - y'(n) \quad (1)$$

— обновляет коэффициенты фильтра, используя следующее выражение

$$\begin{aligned} w(n+1) &= w(n) - \left(\frac{\mu}{2}\right) \left(\text{grad}(J(w(n))) \right) = \\ &= w(n) + \mu p - \mu R w(n) \end{aligned} \quad (2)$$

где μ — положительный коэффициент (определяет размер шага) и $w(n)$ — вектор коэффициентов фильтра. Алгоритм сходится, если $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$, где λ_{\max} — максимальное собственное число корреляционной матрицы $R = u(n)u^T(n)$, с размерностью $(N+1) \times (N+1)$, $u(n)$ — входной вектор фильтра, N — порядок программируемого фильтра.

Скорость сходимости алгоритма зависит от величины разброса собственных чисел матрицы R , то есть чем меньше отношение $\lambda_{\max} / \lambda_{\min}$, тем быстрее сходится ит-

ационный процесс. Однако, для реализации градиентного метода необходимо знать значения матрицы R и вектора взаимных корреляций P . На практике могут быть доступны лишь оценки этих значений, получаемые без какого-либо усреднения:

$$\hat{R} = u(n)u^T(n) \quad (3)$$

$$\hat{P} = y(n)u(n) \quad (4)$$

При использовании данных оценок получим:

$$\begin{aligned} w(n+1) &= w(n) + \mu y(n)u(n) - \mu u(n)u^T(n)w(n) = \\ &= w(n) + \mu u(n)(y(n) - u^T(n)w(n)) \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение, стоящее в скобках, представляет собой разность между образцовым и выходным сигналом фильтра на n -м шаге, то есть ошибку фильтрации. С учетом этого, выражение для рекурсивного обновления коэффициентов фильтра примет вид:

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)u(n) \quad (6)$$

Верхняя граница для размера шага μ определяется из выражения:

$$\mu_{\max} = \frac{2}{[(N+1)(\sigma_x^2)]}. \quad (7)$$

где σ_x^2 — средний квадрат входного сигнала фильтра. Нормализованный алгоритм по критерию наименьшего среднеквадратичного отклонения (Normalized Least Mean Squares, NLMS) представляет собой модифицированную форму стандартного LMS — алгоритма. NLMS — алгоритм обновляет коэффициенты адаптивного фильтра, используя следующее выражение:

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) \frac{u(n)}{\|u(n)\|^2} \quad (8)$$

Данное выражение можно привести к следующему виду [3]:

$$w(n+1) = w(n) + \mu(n)e(n)u(n) \quad (9)$$

где $\mu(n) = \frac{\mu}{\|u(n)\|^2}$. Таким образом, очевидно, что алгоритм NLMS практически аналогичен алгоритму LMS, за исключением меняющегося во времени размера шага $\mu(n)$.

Разработка модели адаптивной фильтрации и экспертной системы

Основное достоинство алгоритмов LMS состоит в простоте реализации. Его функционирование обеспечивается наименьшим числом арифметических операций по сравнению с другими алгоритмами. При подстройке коэффициентов фильтра на каждом шаге нужно выполнить $N+1$ пар операций «сложение — умножение», где N — порядок фильтра.

Как правило, реализация таких алгоритмов требует меньше вычислительных ресурсов и памяти, чем, напри-

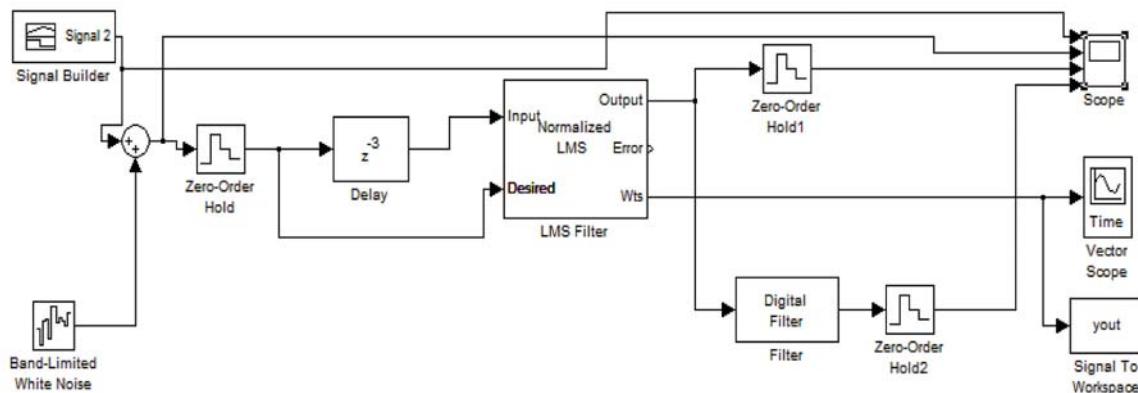


Рис. 1. Схема моделирования работы адаптивного фильтра

мер, рекурсивные алгоритмы, использующие критерий наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS) [4]. Следует отметить, что использование данного алгоритма не позволяет получить достаточно высокую скорость сходимости и повышает дисперсию ошибки.

Схема, реализующая адаптивную фильтрацию, составленная из функциональных блоков системы Simulink приведена на рис. 1. Меняющийся во времени шаг в нормализованном LMS — алгоритме позволяет несколько увеличить время сходимости по сравнению со стандартным LMS-алгоритмом. Таким образом, алгоритм NLMS является наиболее оптимальным алгоритмом для решения поставленной задачи. Форма полезного сигнала изображена на графике (рис. 2).

Для того чтобы уменьшить остаточный шум в сигнале, который снимается с выхода адаптивного фильтра, был применён цифровой фильтр низких частот сорокового порядка. Расчёт фильтра производился с помощью пакета FDAtool.

Данный фильтр обладает конечной импульсной характеристикой, имеет частоту дискретизации 48 кГц и граничную частоту полосы пропускания 4 кГц. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) этого фильтра представлена на рис. 3.

При проведении эксперимента полезный сигнал генерировался блоком Signal Builder (рис. 1). Далее с помощью сумматора на него накладывался белый шум. Смесь полезного сигнала с шумом, проходя через АЦП, поступала на элемент задержки. Далее сигнал поступал на вход адаптивного фильтра (Input).

Зашумлённый сигнал с АЦП поступал на вход адаптивного фильтра (Desired). Таким образом, сигнал на входе адаптивного фильтра был задержан в данном случае на три такта относительно сигнала, поступающего на задающий вход. Сигнал с выхода адаптивного фильтра (Output) поступал на дискретный фильтр низких частот (ФНЧ). Отфильтрованный сигнал с выхода ФНЧ поступал на ЦАП и далее регистрировался осциллографом.

Так же на осциллограф подавался сигнал с выхода адаптивного фильтра, полезный и зашумлённый сигналы. Полезный сигнал имел амплитуду равную 0,9685 В.

Аддитивная смесь полезного сигнала с шумом формировалась с использованием белого шума с максимальной амплитудой равной 4,229 В. При этом обеспечивалось отношение амплитуды полезного сигнала к амплитуде шума $\Delta_1 = 0,229$. Осциллограмма зашумлённого сигнала представлена на рис. 5.

В результате проведения эксперимента были получены следующие данные: за счет адаптивной фильтрации амплитуда шума была уменьшена до 0,3085 В. Амплитуда полезного сигнала изменилась незначительно. Осциллограмма

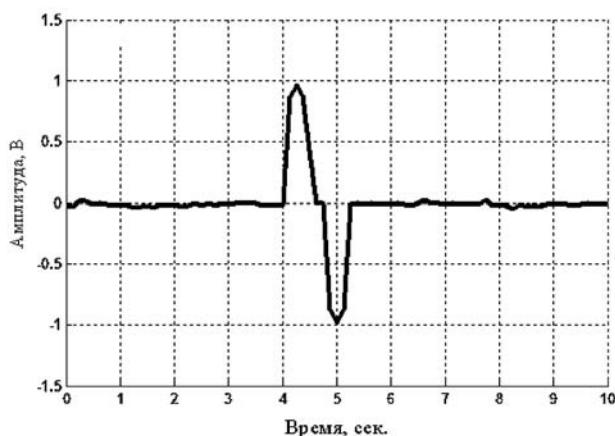


Рис. 2. Полезный сигнал рефлектометрии

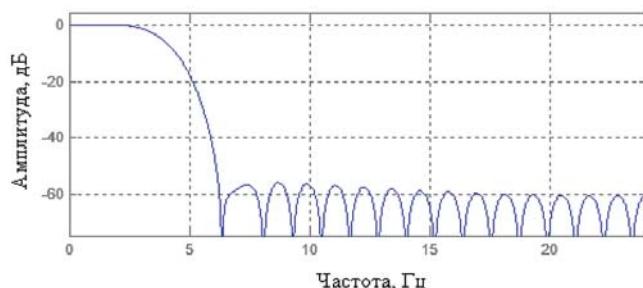


Рис. 3. АЧХ цифрового фильтра низких частот

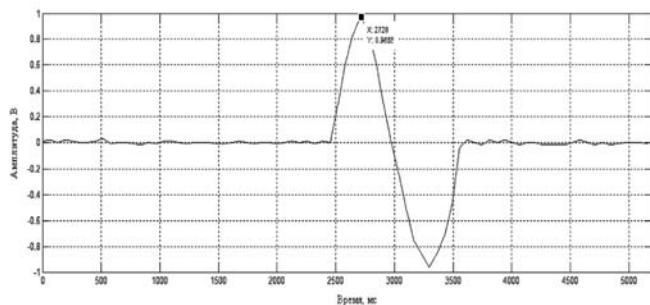


Рис. 4. Осциллограмма полезного сигнала

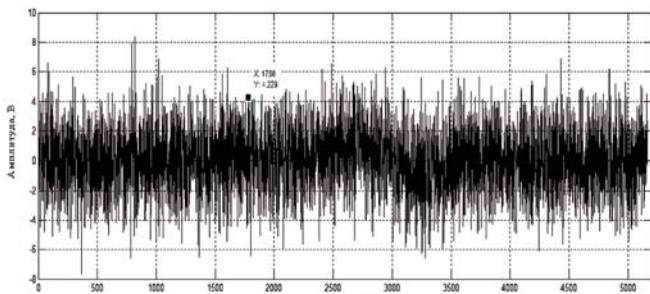


Рис. 5. Осциллограмма зашумленного сигнала

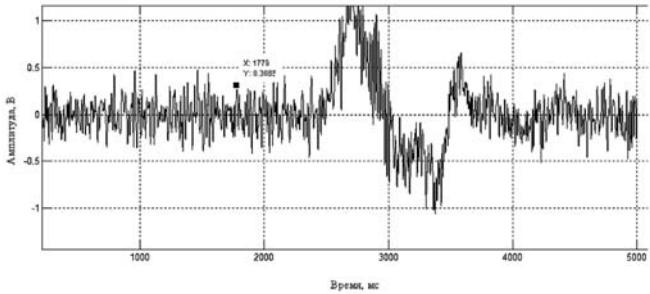


Рис. 6. Осциллограмма отфильтрованного сигнала

отфильтрованного сигнала изображена на рис. 6. Для повышения достоверности идентификации устройств, подключенных в длинной линии, предложено использовать технологию экспертизы систем (ЭС).

Применение ЭС обеспечивает контроль целостности проводных коммуникаций при воздействии элементов: блока распознавания сигнала, состоящего из модуля тригера и блоков обучения и анализа. Как известно, экспертная система обладает следующими возможностями [5]:

- обеспечивается принятие решения в условиях неопределенности;
- способность получения информации для обоснованной интерпретации результатов моделирования;
- возможность пополнения базы знаний;
- полнота полученных данных позволяют формировать рекомендации для решения задачи идентификации подключенных устройств. Общая структурная схема ЭС представлена на рис. 7.

Блок формирования априорных данных предназначен для получения новых фактов на основе сопоставления исходных данных из рабочей памяти и знаний из базы знаний. Механизм логического вывода в структуре экспертной системы занимает наиболее важное место. Он реализует алгоритмы прямого и/или обратного вывода и формально может быть представлен процедурами:

- выбор из базы знаний и рабочей памяти правил и фактов;
- сопоставления правил и фактов, на основании которых производится идентификация;
- разрешение конфликтов, определяющее порядок использования правил, если в заключении указаны одинаковые имена фактов с разными значениями и осуществляющее выполнение действий, соответствующих полученному значению правила.

Подсистема объяснения предоставляет эксперту рекомендации по тестированию системы и повышает достоверность полученных результатов. На рис. 7 показан алгоритм адаптивной фильтрации, который является неотъемлемой частью блока формирования априорных данных в условиях неопределенной шумовой и помеховой обстановки. Данный алгоритм используется для нахождения искомого сигнала и заносится в базу знаний. Для обучения системы в базу данных записываются неизвестные сигналы.

Если экспертная система определяет, что сигнала в базе знаний и правил нет, она вводит в базу новый сигнал. Кроме того, экспертная система реализует диалог с пользователем и дает рекомендации по дальнейшим действиям. Блок схемы обучения системы представлена на рис. 8. Решение о подобии выносится на основе сравнения максимальных амплитуд (пиков) по данным пикового детектора полученного и записанного из базы сигналов [6, 7]. Поскольку сигналы с крутыми фронтами имеют в большинстве случаев по одному или двум пикам на каждый период, после аппроксимации пиковых значений с амплитудами, лежащими ниже области пиков можно с достаточной



Рис. 7. Структурная схема ЭС

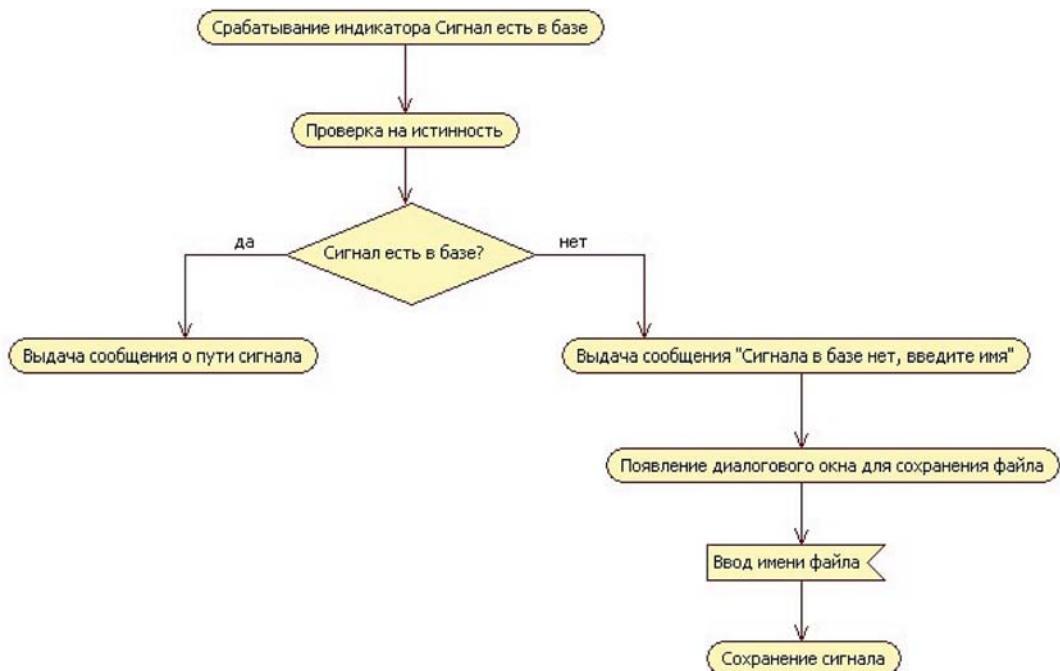


Рис. 8. Блок-схема блока обучения ЭС

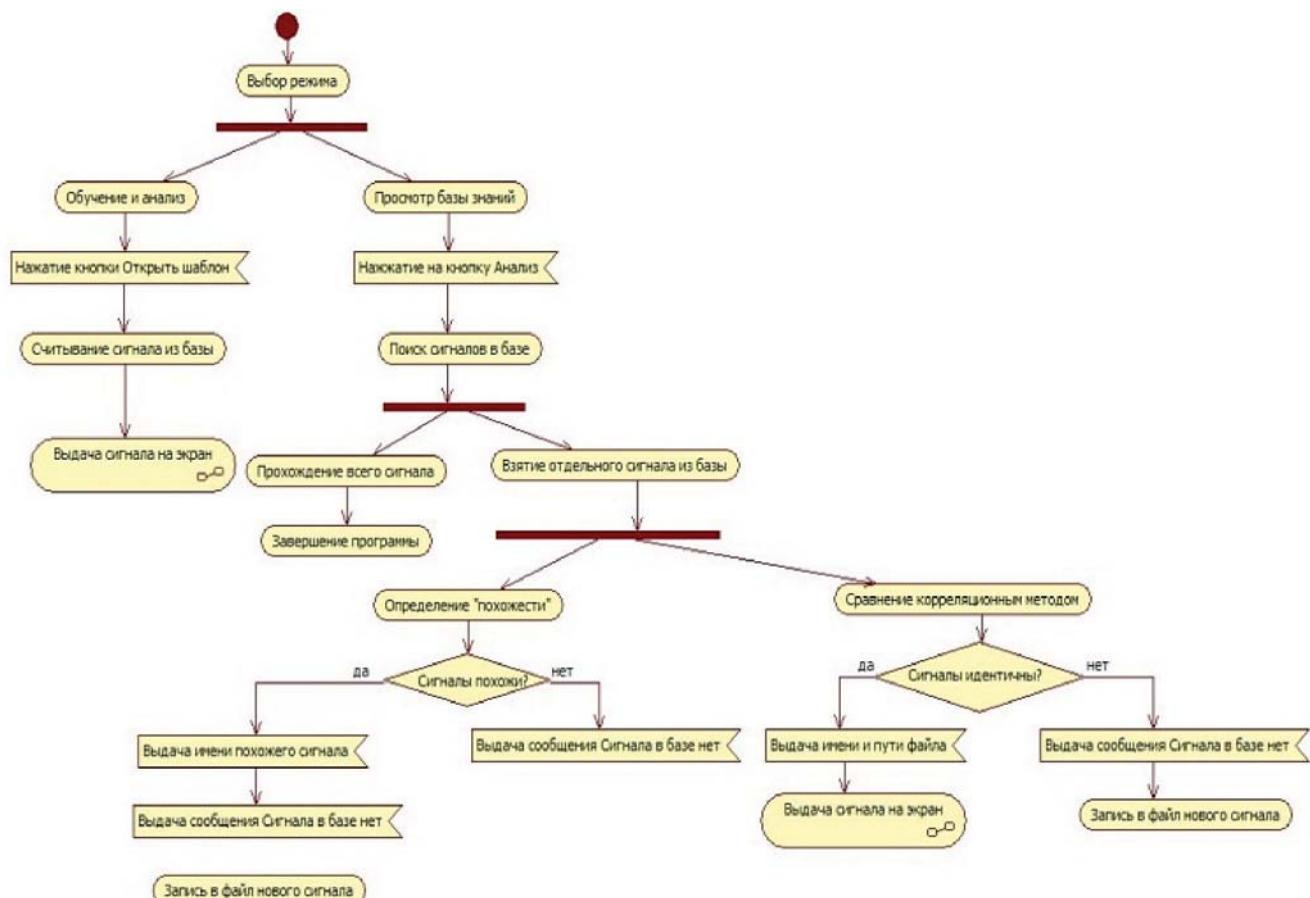


Рис. 9. Блок-схема работы с ЭС в режиме анализа

достоверностью восстановить форму искомого сигнала. Если сигналы имеют одинаковое количество пиков [7, 8], то проверяется предположение, что их расположение на временной оси одинаковое.

Для этого массив позиций пиков первого сигнала вычитается из второго, берётся абсолютное значение каждого элемента, вычисляется их среднее значение путём суммирования всех элементов и деления на их количество.

В случае совпадения указанного числа с первым элементом массива программа — переходит к сравнению максимальных амплитуд в их позициях. Если схожесть определена, выдаётся сообщение о соответствии сигнала искомому в базе.

Блок-схема работы с ЭС в режиме анализа представлена на рис. 9. Если система обнаруживает, что по какому-либо критерию сигнал похож на имеющийся в базе знаний, она выдаёт соответствующее сообщение. В противном случае пользователю выдается сообщение, что сигнал отсутствует в базе предлагается сохранить сигнал [9] в базе знаний, присвоив ему соответствующее имя.

Выходы

В ходе выполненной работы показана возможность подавления шумов в рефлектограммах длинных линий на основе применения алгоритмов адаптивной фильтрации и использования технологии экспертизы систем для повышения достоверности идентификации подключенных устройств. Создан макет программно-аппаратного комплекса, позволяющего исследовать эффективность адаптивной фильтрации сигналов в ходе моделирования задачи рефлектометрии длинных линий.

За счет разработанной экспертной системы стало возможным диагностировать не только наличие неоднородностей, но и проводить идентификацию устройств, подключенных к длинной линии.

Литература

1. Бельчиков А.В., Кривозубов П.А. Средства обеспечения безопасности проводных телекоммуникационных систем (Обзор) // Вопросы защиты информации 2011. № 1. С. 44–51
2. Уидроу Б., Стирнз С.Д. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
3. Сергиенко А. Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в Matlab // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 1(1). С. 18–28.
4. Рябинин А. М., Филатов В. И., Белков И. В. Модель канала передачи информации с помощью программно-управляемого ПЭМИН // Т-comm: телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 1. С. 77–80.
5. Савкин Л. В., Дмитриев В. Г., Федоров Е. А., Филатов В. И., Гусенков П. А. Нейрорегуляторы в бортовых системах космических аппаратов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2016. № 4. С. 31–39.
6. Филатов В. И. Широкополосная система радиосвязи повышенной скорости передачи информации // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://mai.ru/upload/iblock/d39/d39772f28734c7f81f03bf1fcce5c4a3.pdf>
7. Сивов В. А., Васильев В. А., Мoiseев В. Ф., Савельева М. В., Филатов В. И. Спектрально-энергетическая эффективность квадратурной амплитудно-инверсной модуляции сигналов в системах радиосвязи с кодовым разделением каналов // Электросвязь. 2015. № 2. С. 22–24.



APPLICATION OF AN ADAPTIVE FILTRATION AND EXPERT SYSTEM IN A PULSE SCATTEROMETRY OF LONG LINES

Vladimir I. Philatov,
Moscow, Russia, vfil10@mail.ru

Elena L. Bakulina,
Moscow, Russia

Andrei M. Bonch-Bruevich,
Moscow, Russia

ABSTRACT

The possibility of suppressing noise in trace long lines through the use of adaptive filtering algorithms and the use of expert systems technology to improve the reliability of the identification of the connected devices. The results of experiments confirming the effectiveness of the developed techniques. Analysis of the current level of development and application of pulse reflectometry method for troubleshooting and identification of devices connected to a long line showed that the

measurement results are greatly affected by natural and man-made noise, as well as the state of the line. As a result, the useful signal reflected from eavesdropping information devices and line discontinuities due to the presence of damaged areas can greatly distort. As a result, errors occur in detection and identification of the fault line, and devices connected to it. The aim of the work is to improve the accuracy of pulse reflectometry long lines and the reliability of the identification of the connected devices. If the behavior studies have shown that a positive effect can be achieved through the use of adaptive filtering algorithms of the received signal and the use of expert systems technology. An experimental stand of the software and hardware that allows you to carry out modeling of identifying devices connected to the line and investigate the properties of traces. To increase the value of the signal / noise ratio applied adaptive filtering of the received signal. In the simplest case, the adaptive device comprises a programmable filter and the data processing unit that implements the adaptation algorithm, which is based on a priori information configures the programmable filter coefficients. To solve the problem selected gradient algorithm adaptive signal processing using the minimum criteria of the standard deviation.

For making decision on existence of a signal and its belonging to this or that type the expert system has been offered. It consists of the block of formation of aprioristic data, the knowledge base, the block of formation of a stream, the database, the block of entrance data. In work the special place of the mechanism of a logical conclusion in structure of expert system which realizes algorithms of a direct and return output is allocated. This mechanism can be presented by the sequence of procedures.

During the performed work the possibility of suppression of noise in the reflektogrammakh of long lines on the basis of application of algorithms of an adaptive filtration and use of technology of expert systems for increase in reliability of identification of the connected devices is shown.

Result of researches was development of expert system which will allow to diagnose not only existence of not uniformity in the long line, but also to carry out identification of the connected devices.

Keywords: long lines; pulse reflectometry; adaptive filtering; expert systems; big data; digital analysis; pulse signal.

References

1. Bel'chikov A.V., Krivozubov P.A. Of security facilities for wire telecommunication systems (Review). *Voprosy zashchity informatsii* [Information security questions]. 2011. No. 1. Pp.44-51 (In Russian)
2. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive Signal Processing. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985. 474 p.
3. Sergienko A.B. Algoritmy adaptivnoy fil'tratsii: osobennosti realizatsii v Matlab [Adaptive Filtering Algorithms: Implementation Features in Matlab]. *Exponenta Pro. Matematika v prilozhenijah*. [Exponenta Pro. Mathematics in applications] 2003. Vol. 1. No. 1. Pp.18-28. (In Russian)
4. Rjabinin A.M., Filatov V.I., Belkov I.V. Model of channel information leakage via software – managed side electromagnetic radiation. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No. 1. Pp. 77-80. (In Russian)
5. Savkin L.V., Dmitriev V.G., Fedorov E.A., Filatov V.I., Gusekov P.A. Neuroregulators in Spacecraft Onboard Systems. *Promyshlennye ASU i kontrollery*. [Industrial Automatic Control Systems and Controllers] 2016. No. 4. Pp. 31-39. (In Russian)
6. Filatov V.I. The radio connection broadband system of the increased speed in the process of transmitting the information. *Trudy MAI*. 2015. No. 81. URL: <http://mai.ru//upload/iblock/d39/d39772f28734c7f81f03bf1fcce5c4a3.pdf>. (In Russian)
7. Sivov V.A., Vasil'ev V.A., Moiseev V.F., Savel'eva M.V., Filatov V.I. Spectrum-energy effectiveness of the signals with multyposition squared amplitude-inversion modulation into the communication systems with orthogonal coding division of the channels. *Electrosvyaz*. 2015. No. 2. Pp. 22-24. (In Russian)

Information about authors:

Philatov V.I., PhD, assistant professor, of the Bauman Moscow State Technical University;
Bakulina E.L., student of the Bauman Moscow State Technical University.

For citation: Philatov V.I., Bakulina E.L. Bonch-Bruevich A.M. Application of an adaptive filtration and expert system in a pulse scatterometry of long lines. *H&ES Research*. 2017. Vol. 9. No. 2. Pp. 32-38. (In Russian)