

УДК 519.6

## АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШЕНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

О. Н. Нарышкина, С. И. Овечкин, В. В. Шубин  
(РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров)

Представлены результаты разработки алгоритма обнаружения нарушений оптического волокна, используемого для передачи информационных сигналов. Алгоритм реализован на языке ассемблер в программном обеспечении для микроконтроллера PIC16C717 и на языке C++ для микроконтроллера PIC18F1320, которые входят в состав системы мониторинга прямых потерь оптического волокна по информационным или пилот-сигналам.

*Ключевые слова:* распознавание цифровых сигналов, отношение сигнал/шум, анализатор телекоммуникационных сигналов.

### Введение

Надежность волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) информации во многом зависит от своевременного обнаружения нарушений оптического волокна (ОВ), вызванных различными причинами, в том числе преднамеренной попыткой вывода сигнала. Поэтому современные ВОСП снабжаются системами мониторинга, которые отслеживают и сигнализируют об изменениях прямых и обратных потерь в ОВ. Для оперативного обнаружения нарушений используются системы, встроенные в приемопередающую аппаратуру ВОСП. Выполняются такие системы, как правило, в виде контроллеров, которые по входному сигналу, принятому с ОВ, проводят обнаружение и выделение сигналов нарушения ОВ. Разработке оптимального алгоритма обнаружения нарушений и его реализации в программном обеспечении на языке ассемблер для микроконтроллера PIC16C717 и на языке C++ для микроконтроллера PIC18F1320 посвящена настоящая статья.

### Характеристика входного сигнала

Нарушение передачи по ОВ приводит к изменению мощности оптического сигнала на выходном полюсе ОВ [1]. Сложность обнаружения вывода оптического сигнала обусловлена наличием на входе системы защиты сложного сигнала  $y(t)$ .

Сигнал  $y(t)$  представляет собой реализацию случайного процесса со стационарными перемещениями и состоит из следующих составляющих: постоянная величина  $A$ , случайная составляющая шума  $n(t)$ , стационарные перемещения  $p(t)$ , переменный сигнал нарушения  $s(t)$  (рис. 1, см. также цветную вкладку), т. е.

$$y(t) = A + n(t) + p(t) + s(t).$$

Постоянная составляющая  $A$  пропорциональна коэффициенту передачи между оптическими полюсами ОВ. Шум  $n(t)$  в случае использования любого фотодетектора (PIN, лавинного фотодиода, приемника с квантовым ограничением) определяется тепловой составляющей входных цепей приемника и подчиняется нормальному закону распределения [2]. Помеха  $p(t)$  вызвана внешними и внутренними воздействующими факторами и представляет собой в масштабе времени наблюдения стационарные перемещения. Параметры сигнала попытки нарушения  $s(t)$  являются неопределенными.

Для того чтобы выделить сигнал нарушения из шума, во-первых, нужно определить и учесть постоянную составляющую  $A$ . Во-вторых, необходимо "привязать" время начала наблюдения к начальному моменту появления сигнала нарушения; в противном случае, при их несовпадении, возможны пропуски сигнала нарушения.

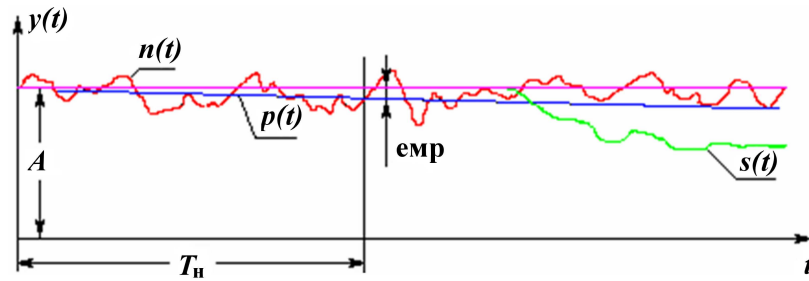


Рис. 1. Составляющие входного сигнала микроконтроллера ( $T_n$  — время наблюдения; емр — единица младшего разряда)

Анализ нарушений с помощью различных способов позволяет разделить все сигналы на три категории: быстрый вывод, плавный вывод, ступенчатый вывод (рис. 2). Соответственно сигналы нарушения различаются по длительности времени вывода  $T_v$  и своей форме.

При использовании устройств типа *ответвитель-прищепка* осуществляется быстрый вывод [3]. При этом значение  $T_{v1}$  (см. рис. 2, а) с учетом переходных процессов аппаратуры регистрации составляет около 1 с. Такой съем преследует цель зарегистрировать (или передать) сигнал либо с незащищенной ВОСП, либо с защищенной ВОСП только за время реакции системы защиты.

При плавном выводе цель нарушителя — скрытое подключение и регистрация перехваченного сигнала в течение длительного времени. Вывод производится с помощью устройства, использующего изгиб ОВ. Этот способ представ-

ляет наибольшую опасность, так как позволяет вывести наиболее точно необходимую для регистрации мощность оптического сигнала и соответственно внести минимальные дополнительные потери  $A_{д2}$  (см. рис. 2, б). Время вывода  $T_{v2}$  в этом случае определяется временем стационарности сигнала и может составлять от 1 до 10 с.

Ступенчатый вывод преследует цель нейтрализовать систему защиты, обнаруживающую плавный вывод, путем многократного вывода мощности сигнала ниже порога обнаружения системы защиты (см. рис. 2, в). При таком способе у нарушителя возникает целый ряд трудностей:

- каждую ступень выводимого сигнала необходимо тщательно дозировать, что затруднительно из-за статистического разброса параметров выводимого сигнала и вносимых потерь. При этом нет контроля вносимых потерь;

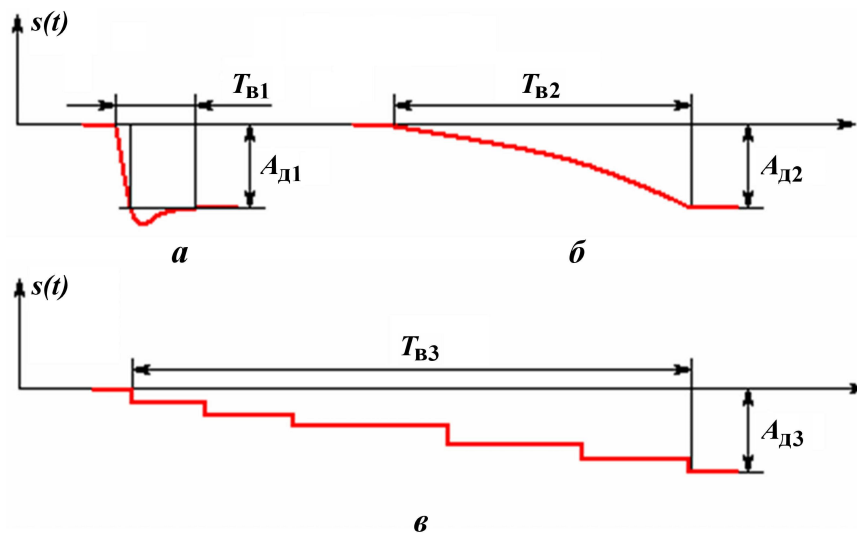


Рис. 2. Формы сигналов нарушения при быстром (а), плавном (б) и ступенчатом (в) выводе оптического сигнала ( $T_v$  — время вывода сигнала;  $A_{д}$  — внесенные дополнительные потери)

- ступень выводимого сигнала складывается с шумом в канале и медленными изменениями, вызванными внешними и внутренними воздействиями на компоненты ВОСП, что статистически изменяет ее реальное значение для системы защиты. Контроля внесенных потерь с учетом воздействий в этом случае также нет;
- вывод оптического сигнала связан с макроизгибом ОВ на небольшой длине по малому радиусу. С течением времени в данном напряженном месте развиваются дислокации, которые приводят к образованию необратимых дефектов. В этом случае возникшие напряжения приводят к уменьшению прямых потерь, а дислокации — к увеличению прямых и образованию обратных потерь (трещины в ОВ);
- техническая сложность реализации медленного ступенчатого вывода сигнала, который требует точного механизма.

Кроме пороговых значений изменения коэффициента передачи ОВ, необходимо определить время вывода, которое ограничено и может находиться в диапазоне от долей секунд (быстрый вывод) до десятков минут (ступенчатый вывод).

Примерный вид плотности распределения вероятности времени вывода  $T_v$  представлен на рис. 3. Быстрый вывод легко обнаруживается и малоэффективен. Медленный ступенчатый вывод трудно реализуем, неточен и малоэффективен. Поэтому можно выбрать диапазон времени вывода, который необходимо заложить в алгоритмы обнаружения сигналов нарушения. Из рис. 3 следует, что вероятное время вывода находится в диапазоне от 0,5 до  $3 \cdot 10^3$  с (40 мин).

Входной аналоговый сигнал  $y(t)$  преобразуется с помощью аналого-цифрового преобразова-

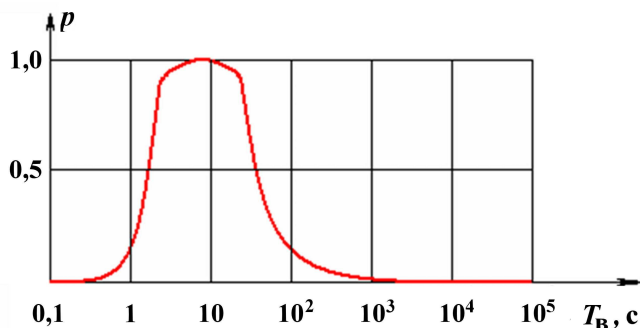


Рис. 3. Распределение плотности вероятности времени вывода сигнала

теля (АЦП) в цифровую (дискретную) форму  $Y$  с частотой дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова, т. е. период дискретизации равен  $t_d \leq 1/2f$ , где  $f$  — полоса частот входного сигнала контроллера. Полоса выбирается такой, чтобы время дискретизации было меньше минимального времени быстрого вывода ( $\sim 0,5$  с).

### Определение вероятностей тревоги и обнаружения

При разработке алгоритма необходимо обеспечить обнаружение сигналов нарушения трех указанных выше типов. Для этого целесообразно создать три независимых алгоритма, каждый из которых должен предназначаться для оптимального обнаружения одного типа сигналов.

Для всех алгоритмов целесообразно использовать критерий Неймана—Пирсона [4], по которому порог обнаружения устанавливается исходя из требования обеспечения заданной вероятности ложных тревог, а амплитуда сигнала нарушения — из требования вероятности обнаружения. В случае одновременной работы трех независимых алгоритмов обнаружения вероятность ложной тревоги будет равна сумме вероятностей по каждому из них:

$$P_{лт} = P_{лт1} + P_{лт2} + P_{лт3}.$$

Оптимальным следует считать случай, когда вероятности равны между собой, т. е.

$$P_{лт1} = P_{лт2} = P_{лт3} = P_{лт}/3.$$

Средняя частота появления ложных тревог контроллера защиты может быть определена по формуле

$$\nu = \frac{t_d}{T_{лт}},$$

где  $t_d$  — период дискретизации, который равен времени принятия решения контроллером о наличии/отсутствии сигнала нарушения;  $T_{лт}$  — среднее время наработки на ложную тревогу.

Например, при  $T_{лт} = 10\,000$  ч и  $t_d = 0,165$  с средняя частота ложных срабатываний составит  $\nu = 4,58 \cdot 10^{-9}$ . Соответственно вероятности можно задать на уровне

$$P_{лт1} = P_{лт2} = P_{лт3} = 1,5 \cdot 10^{-9}.$$

При использовании трех отдельных алгоритмов для каждого типа сигналов вероятности об-

нарушения для всех сигналов нарушения должны быть одинаковы и равны заданной вероятности обнаружения, т. е. требуется, чтобы

$$P_{об} = P_{об1} = P_{об2} = P_{об3}.$$

### Обнаружение быстрого вывода

Быстрый вывод удобно обнаруживать по производной входного сигнала, сравнивая ее с пороговым значением. В цифровом виде это сравнение модуля разности двух соседних отсчетов сигнала  $Y_i$  и  $Y_{i-1}$  с заданным пороговым значением  $Y_{п1}$ , т. е. критерий обнаружения быстрого вывода представляет собой неравенство

$$|Y_i - Y_{i-1}| \geq Y_{п1}.$$

Отношение порог/помеха по критерию Неймана—Пирсона в этом случае составит [4]

$$Z_{п1} = \frac{Y_{п1}}{\sigma} = \frac{\ln L_{п1} + 0,5m}{\sqrt{m}}.$$

Здесь  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение шума;  $L_{п1}$  и  $m$  определяются по формулам

$$L_{п1} = e^{0,5[\Phi^{-1}(P_{лт1})^2 - \Phi^{-1}(1-P_{об1})^2]},$$

$$m = [\Phi^{-1}(P_{лт1}) - \Phi^{-1}(1 - P_{об1})]^2,$$

где  $\Phi^{-1}$  — обратная функция Лапласа;  $P_{лт1}$  — вероятность появления ложной тревоги;  $P_{об1}$  — вероятность обнаружения сигнала нарушения.

Обратная функция Лапласа (функция ошибок) определяется зависимостью

$$\Phi(Q)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t=Q}^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

Функция табулирована в области малых значений  $Q \leq 3$ . Но поскольку интерес представляют большие значения  $Q$ , удобно пользоваться не таблицами, а графиком функции.

Например, при вероятности ложных тревог  $P_{лт1} = 10^{-9}$  обратная функция Лапласа  $\Phi^{-1} = 6,0$ . При вероятности обнаружения  $P_{об1} = 0,99999$  будем иметь  $\Phi^{-1}(0,00001) = 4,25$ . Соответственно

$$L_{п1} = e^{0,5 \cdot (36 - 18,06)} = 7908,3;$$

$$m = (6,0 - 4,25)^2 = 3,06;$$

$$Z_{п1} = [\ln(7908,6) + 1,53] / 1,75 = 6,0.$$

Для определения порога  $Y_{п1} = Z_{п1}\sigma$  необходимо определить среднее квадратическое отклонение шумового сигнала  $\sigma$  с заданной плотностью распределения вероятности при сравнении соседних отсчетов. Оценка  $\sigma$  может быть получена по шумовой дорожке осциллограммы (ширина дорожки составляет  $\sim 3\sigma$ ) (рис. 4) или по гистограмме распределения разности между соседними отсчетами (рис. 5). Для нормального распределения среднее квадратическое отклонение определяется как  $\sim 0,606$  от амплитудного значения.

Из рис. 4, видно, что напряжение шумовой дорожки составляет  $U_{ш} = 10$  мВ ( $\sim 2$  емр). Соответственно  $\sigma = U_{ш}/3 = 3,3$  мВ. Тогда для рассматриваемого примера  $Y_{п1} = 3,3 \cdot 6 = 19,8$  мВ = 4 емр.

### Обнаружение плавного вывода

Для обнаружения плавного вывода оптического сигнала целесообразно использовать теорию обнаружения и выделения сигналов на фоне случайных помех [4]. Как уже отмечалось, сигнал представляет собой полностью случайный про-

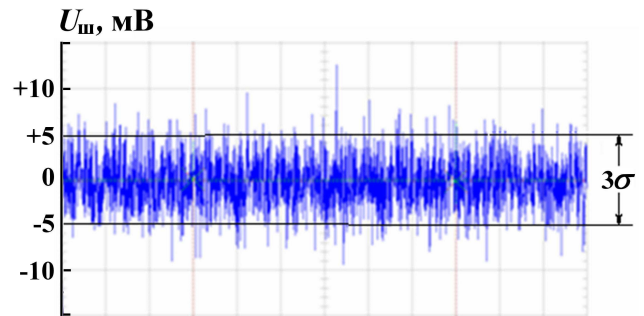


Рис. 4. Осциллограмма шума на входе контроллера защиты

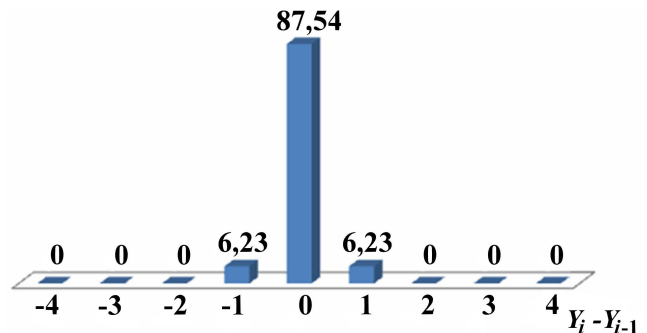


Рис. 5. Гистограмма распределения разности двух соседних отсчетов

цесс с неопределенными параметрами: амплитудой, формой, фазой, временем появления и длительностью. В этом случае отношение правдоподобия равно [4]

$$\mathcal{L}(s_1, \dots, s_5) = \frac{w_n(Y_i - S_i)}{w_n(Y_i)},$$

где  $s_1, \dots, s_5$  — неопределенные параметры;  $w_n(Y_i)$  — плотность распределения вероятности входной реализации;  $w_n(Y_i - S_i)$  — плотность распределения вероятности входной реализации без сигнала нарушения.

Задачу необходимо решать путем интегрирования по каждому из неопределенных параметров произведения:

$$\mathcal{L} = \int \int \int \mathcal{L}(s_1, \dots, s_5) w_a(s_1, \dots, s_5) ds_1 \dots ds_5,$$

где  $w_a$  — плотность распределения вероятности по параметрам;  $\mathcal{L}$  — коэффициент правдоподобия.

Известно [2], что при некоррелированных сигнале и шуме коэффициент правдоподобия пропорционален  $\exp(L/2)$  поэтому обнаружение удобно вести, определяя  $L$ . Если сигнал и шум представляют собой случайные процессы с белыми спектрами, решение принимает вид [4]

$$L = \frac{1}{D} \sum_{g=1}^H Y_g^2, \quad (1)$$

где  $D$  — дисперсия шума;  $Y_g$  — приходящее возмущение;  $H$  — количество отсчетов за время наблюдения.

Дисперсия шума  $D$  постоянна, поэтому достаточно вычислять значение произведения  $LD$ .

Для практической реализации выражения (1) необходимо решить две задачи: 1) определить время начала съема сигнала; 2) коррелировать начало наблюдения и начало прихода сигнала нарушения. В качестве момента начала съема сигнала целесообразно принять среднее выборочное значение за промежуток времени непосредственно перед обнаружением. Для корреляции наблюдения и сигнала нарушения предлагается проводить обнаружение постоянно, при каждом отсчете, считая, что сигнал нарушения может появиться в любой момент времени. На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма обнаружения сигнала нарушения, разработанного по вышеизложенным принципам.

В каждый момент  $k$  запоминаются  $N$  предыдущих цифровых отсчетов  $Y_i$  входного аналого-

вого сигнала  $y(t)$ . По отсчетам от  $k - N$  до  $k - n - 1$  вычисляется среднее выборочное значение  $\bar{Y}$ , которое вычитается из последующих отсчетов (от  $k - n$  до  $k$ ). Полученные разности возводятся в квадрат и суммируются. Таким образом, в каждый момент времени  $k$  производится вычисление параметра  $L_k$  по формуле

$$L_k = \sum_{i=k-n}^k \left( Y_i - \frac{1}{N-n} \sum_{i=k-N}^{k-n-1} Y_i \right)^2.$$

Сумма квадратов отклонений  $L_k$  сравнивается с пороговым значением  $L_{п2}$ . В случае  $L_k \geq L_{п2}$  считается, что сигнал нарушения обнаружен.

Рис. 7 (см. также цветную вкладку) иллюстрирует обнаружение сигнала нарушения по предлагаемому алгоритму.

Остается определить время наблюдения  $T_{н2}$  и пороговое значение  $L_{п2}$ .

Время плавного вывода с точки зрения нарушителя должно быть таким, чтобы внешние воздействия не оказывали влияния на выводимую мощность. Поэтому время вывода мож-

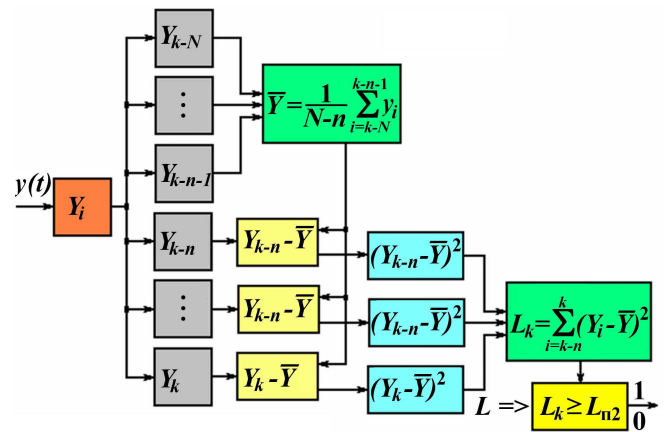


Рис. 6. Блок-схема алгоритма обнаружения сигнала съема при плавном выводе

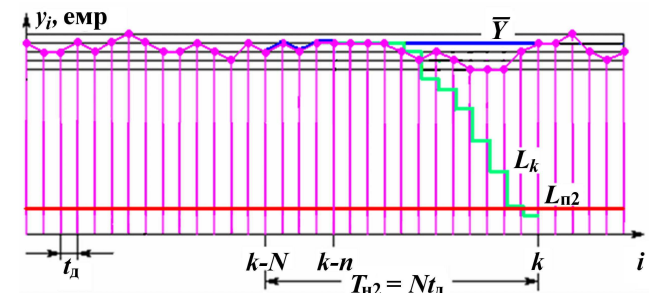


Рис. 7. Обнаружение сигнала нарушения при плавном выводе

но определить как интервал, в течение которого случайный процесс может считаться стационарным и эргодичным. Для стационарного случайного процесса распределение будет иметь нормальный характер, а эргодичность позволит заменить распределение случайной величины по амплитуде распределением по времени.

Практически это делается следующим образом. Первоначально определяется необходимое и достаточное количество уровней дискретизации по амплитуде сигнала, так чтобы шумовая дорожка составляла 2–3 емр АЦП. Время наблюдения  $T_{н2}$  (количество отсчетов  $N = T_{н2}/t_d$ ) определяется из условия, что изменение среднего выборочного значения сигнала за это время не превышает 1 емр [5].

### Установка порога обнаружения плавного вывода

Как уже отмечалось, пороговое значение  $L_{п2}$  устанавливается по критерию Неймана–Пирсона таким образом, чтобы обеспечить заданную вероятность ложной тревоги (или среднее время наработки на ложную тревогу). При этом значение сигнала нарушения  $L_s$ , которое обеспечит требуемую вероятность обнаружения сигнала, определяется при установленном пороге  $L_{п2}$ . Рис. 8 иллюстрирует установку порога и определение вероятностей.

В отсутствие сигнала нарушения плотность нормального распределения вероятности шума  $n(t)$  центрирована. Пороговое значение  $L_{п2}$  устанавливается по требуемому значению вероятности ложной тревоги при отсутствии сигнала нарушения, которое равно

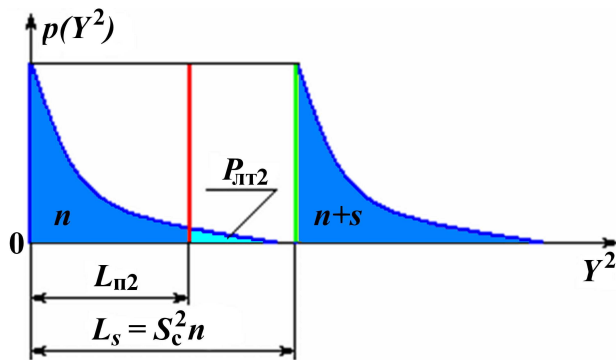


Рис. 8. Установка порога обнаружения плавного вывода

$$P_{лт2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{Y=\sqrt{L_{п2}}}^{\infty} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma^2}} dY,$$

или с использованием обратной функции Лапласа

$$P_{лт2} = \frac{1}{\sigma} \Phi^{-1} \left( \frac{\sqrt{L_{п2}}}{\sigma} \right).$$

Порог обнаружения вычисляется по формуле

$$\Phi^{-1} \left( \frac{\sqrt{L_{п2}}}{\sigma} \right) = \sigma P_{лт2}.$$

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  при заданной вероятности ложной тревоги определяет значение порога.

На рис. 9 (см. также цветную вкладку) приведены зависимости плотности нормального распределения вероятности сигнала  $Y$ , рассчитанные по формуле

$$p(Y^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma} \varphi \left( \frac{Y}{\sigma} \right),$$

где  $\varphi(t)$  — табулированная плотность нормального распределения

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}.$$

На рис. 9 также представлены гистограммы распределений первых пятидесяти отсчетов для  $\sigma = 2,6$ . Сравнивая расчетные и экспериментальные гистограммы, можно оценить значение  $\sigma$ . Например, анализируя экспериментальные гистограммы для двух изделий одного типа, представленные на рис. 10, можно сделать вывод, что  $\sigma \leq 2$ .

При появлении детерминированного сигнала нарушения ОБ  $S(t)$  исходное распределение сместится (см. рис. 8) на величину

$$L_s = S_c^2 n,$$

где  $S_c$  — среднее значение сигнала за период наблюдения;  $n$  — количество отсчетов, по которому происходит обнаружение сигнала.

На рис. 11 представлена экспериментальная гистограмма распределения для сигнала постоянной амплитуды 2 емр и  $n = 64$ . Одно деление по оси абсцисс составляет 30 емр<sup>2</sup>. Среднее значение сигнала  $S_c$  зависит от его формы.

На рис. 12 приведены зависимости  $L_s$  от амплитуды сигнала  $S$  в конце цикла обнаружения

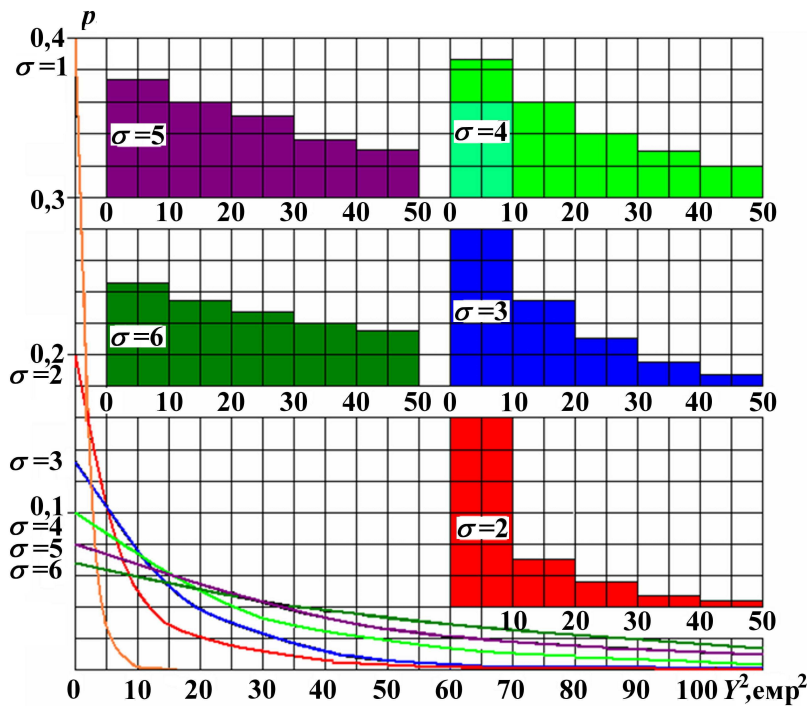


Рис. 9. Расчетные зависимости плотности нормального распределения вероятности сигнала при различных значениях  $\sigma$  и гистограммы распределений первых пятидесяти отсчетов ( $\sigma = \overline{2, 6}$ )

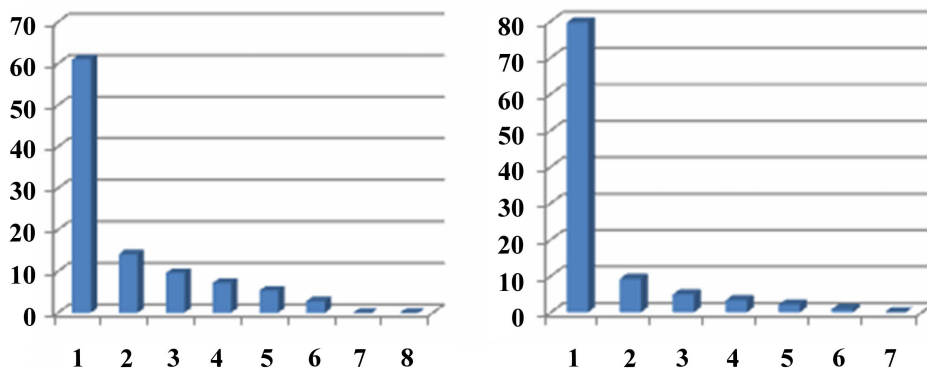


Рис. 10. Экспериментальные гистограммы распределения отсчетов для двух изделий одного типа

из 56 отсчетов для двух предельных форм вывода сигнала  $S$ : ступенчатого на первом отсчете и плавного за 56 отсчетов. Очевидно, что нормирование порога необходимо проводить по наилучшему случаю (плавный вывод).

### Обнаружение ступенчатого вывода

Ступенчатый вывод сигнала из ОВ преследует цель вывести сигнал достаточно большой мощности в обход системы защиты. Для этого необходимо выводить мощность сигнала ступенями, каждая из которых по амплитуде

меньше порога обнаружения плавного вывода  $S_{п2}$  примерно в два раза. При этом длительность каждой ступени должна быть больше, чем время наблюдения плавного вывода  $T_{н2}$ . Общее время ступенчатого вывода должно быть как можно меньше, так как с течением времени за счет внешних и внутренних воздействий меняются как мощность излучателя ВОСП, так и коэффициент передачи. Если мощность излучателя может как уменьшаться, так и увеличиваться, то коэффициент передачи с течением времени становится только меньше.

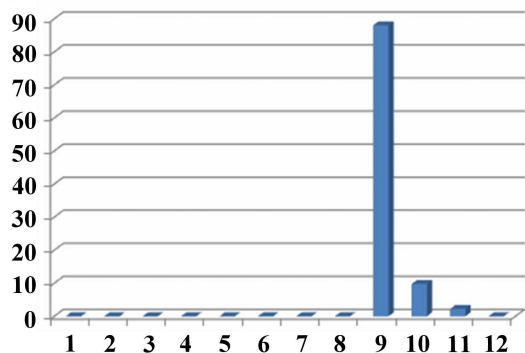


Рис. 11. Экспериментальная гистограмма распределения сигнала

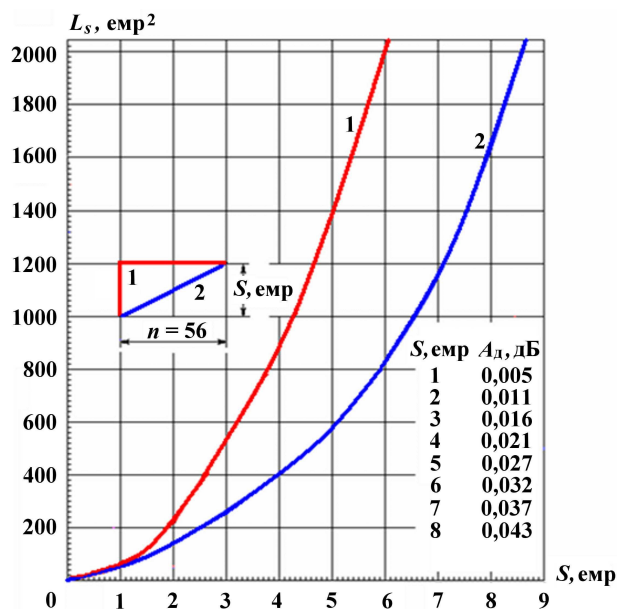


Рис. 12. Зависимости  $L_s$  от амплитуды сигнала  $S$  для двух форм вывода сигналов: 1 — ступенчатого; 2 — плавного

Это обусловлено тем, что ОВ за счет внутренних напряжений, вызванных изгибом, стремится принять первоначальную форму.

Обнаружение ступенчатого вывода целесообразно осуществлять таким же образом, как и плавный вывод, только в другом масштабе времени. За время дискретизации  $t_{д3}$  принимается время наблюдения  $T_{н2}$  плавного вывода, а за время наблюдения  $T_{н3}$  — среднее время, в течение которого изменение среднего значения входного сигнала контроллера превысит пороговое значение обнаружения ступенчатого вывода.

## Программная реализация алгоритма

Разработанный алгоритм реализован в программном обеспечении для микроконтроллеров PIC16C717 и PIC18F1320 соответственно на языках Ассемблер и C++ в программной среде MPLABIDE v.8.84, которая представляет собой полную интегрированную среду разработки (Integrated Development Environment) для PIC-микроконтроллеров.

Программа состоит из следующих основных блоков:

- установка входных параметров контроллера;
- считывание данных;
- обработка полученных данных;
- анализ результатов вычислений.

Программа отлажена при помощи MPLAB-симулятора и апробирована экспериментально.

Предложенный алгоритм и программа обеспечивают эффективное обнаружение всех видов нарушений по анализу принимаемых информационных сигналов или пилот-сигналов. Алгоритм оформлен в виде патента на изобретение.

## Список литературы

1. *Popov S. N., Shubin V. V.* Information protection in optical fiber links and systems // Second Int. Fiber Optics Conference (ISFOC-92). Sanct-Petersburg. October 5–9, 1992.
2. Техника оптической связи. Фотоприемники / Под ред. У. Тсанга. М.: Мир, 1988.
3. Oyster Optic. Securing Fiber Optic Communications against Optical Tapping Methods. www.oster.com.
4. *Шестов Н. С.* Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Советское радио, 1967.
5. *Шубин В. В.* Волоконно-оптические системы и информационная безопасность. С.-Пб.: Ива, 2006.

Статья поступила в редакцию 05.03.14.