

Измерение параметров импульсных помех в пакетной радиолинии

**А.Ю. Беккиев¹,
В.А. Маковий²**

¹АО «Российская электроника», Москва 121357, Россия

²АО «Концерн «Созвездие», Воронеж 394018, Россия

@Автор для переписки, e-mail: sosmackayev@yandex.ru

Современные средства радиосвязи обеспечивают надежную передачу данных за счет адаптации радиолинии к реальной помеховой обстановке. Проведение корректных сравнительных испытаний различных радиостанций, предлагаемых производителями, и объективное сравнение полученных в полевых условиях результатов невозможно без инструментального контроля фактических параметров сигнала и помеховой обстановки в точке приёма. В работе рассматривается функционирование систем радиосвязи тактического звена управления при воздействии мощных импульсных помех различной природы. Предложен прибор, позволяющий производить оценку основных параметров импульсных помех, а именно эффективного значения огибающей смеси полезного сигнала, аддитивного шума, эффективного значения огибающей импульсных помех, скважности импульсных помех. Для обеспечения независимости измерений от конкретной реализации демодуляторов предложено использовать огибающую сигнала, принимаемого радиостанцией. Разработанный прибор в качестве измерительных сигналов использует штатные информационные пакеты радиолинии и не требует изменений в алгоритмах и временных диаграммах радиолинии или радиосети. Предложен метод измерения эффективного значения огибающей полезного сигнала и среднеквадратичного значения аддитивного шума при наличии импульсных помех в принимаемом сигнале. Доказано, что получение адекватных оценок мощности смеси полезного сигнала и шума возможно при отбрасывании значений выборки, подверженных воздействию импульсных помех. Предложено устройство, производящее сепарацию символов из принятых пакетов на символы, пораженные импульсными помехами и символы, не пораженные таковыми. Получены аналитические выражения, позволившие синтезировать алгоритмы функционирования прибора. Разработана структурная схема измерителя, приведены алгоритмы получения оценок измеряемых параметров.

Ключевые слова: тактическое звено управления, импульсные помехи, измерительный прибор, параметры импульсных помех.

Impulse Noise Parameter Assessment in a Batch Radio Channel

Azret Yu. Bekkiev¹,
Vladimir A. Makoviy²

¹JSC "Ruselectronics", Moscow 121357, Russia

²JSC "Concern "Sozvezdie", Voronezh 394018, Russia

@Corresponding author e-mail: sosmackayev@yandex.ru

Modern radio communication means to provide safe data transmission due to adapting radio channel to the actual noise environment. It is impossible to conduct proper comparative tests on various radio stations offered by manufacturers and to compare objectively the results obtained in field without actual signal parameters and noise environment instrument inspection at the reception point. The paper considers tactical level radio communications system operation when jammed with powerful impulse noise of various nature. It suggests a device enabling to assess the main parameters of impulse noise, namely desired signal and additive noise mixture envelope effective value, impulse noise envelope effective value, impulse noise duty factor. To provide measurement independence from a specific realization of a decoder it is suggested to use the envelope of a signal received by a radio station. The developed device uses standard radio channel data batches as measuring signals and does not require changing radio channel or radio network algorithms and timing charts. A method to assess the effective value of desired signal envelope and additive noise mean-square value when the received signal involves impulse noise is suggested. The paper demonstrates that valid assessment of desired signal and additive noise mixture is possible in case of setting aside selection values affected by impulse noise. A device separating symbols affected by impulse noise from those that are not affected is suggested. Formulas that allow synthesizing the device operation algorithms are obtained. The structure chart of the measurer is developed; the algorithms used to assess measured parameters are given.

Keywords: tactical control unit, impulse noise, measuring instrument, impulse noise parameters.

В настоящее время мир становится цифровым. Данное утверждение относится и к системам радиосвязи. Современные цифровые системы радиосвязи основаны на пакетной передаче информации. Важнейшими из систем радиосвязи являются системы радиосвязи тактического звена, которые основываются на пакетных радиоканалах с многокритериальной адаптацией под фактические условия распространения радиосигнала [1]. Обеспечение надежной и непрерывной радиосвязи в условиях информационного противоборства возможно при адаптации радиолиний и радиосетей к фактической электромагнитной обстановке. Повышение устойчивости и оперативности автоматического управления войсками обуславливает увеличение глубины адаптации и количества параметров радиолинии или радиосети, изменяемых в процессе адаптации [2]. Актуальность рассматриваемых вопросов определяется тем, что измерение основных параметров принимаемого сигнала необходимо для контроля фактической помеховой обстановки и затухания на трассе распространения радиосигнала. Проведение корректных сравнительных испытаний различных методов адаптации, предлагаемых производителями

техники радиосвязи, и объективное сравнение полученных в полевых условиях результатов невозможно без инструментального контроля фактических параметров сигнала и помеховой обстановки в точке приёма.

Производители современных радиосредств декларируют высокую эффективность различных проприетарных технических решений. Учитывая, что в тактическом звене управления радиосвязь является основным видом связи [3], необходимо сопоставлять эффективность различных решений. Чтобы сравнение было объективным, следует осуществлять работу различных систем в равных условиях. Измерительный комплекс, позволяющий осуществлять инструментальный контроль параметров воздействующих помех, предложен в настоящей статье.

В качестве примера рассмотрим пакетную систему радиосвязи тактического звена управления на используемых в частях серийных радиостанций, принятых на снабжение Минобороны России [4]. В системах связи с коммутацией пакетов для осуществления доставки информации передаваемая информация разбивается на пакеты. Информацией может служить любая дискретная информация, например, сообщения, файлы, кодированная речь и т.д. Далее пакетная радиостанция осуществляет передачу пакетов, содержащих информацию, причем передача может происходить с использованием ретрансляции через другие радиостанции, принадлежащие системе связи, т.е. по одному или несколькими составным маршрутам, или напрямую между абонентами. Принимающая пакетная радиостанция преобразует принятые пакеты в абонентскую информацию с последующей передачей абоненту. В общем случае доставка информации между двумя абонентами может осуществляться по различным маршрутам. При отсутствии ретрансляции в сети из n пакетных радиостанций возможно существование $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$ различных радиолиний.

Обеспечение надежности радиосвязи достигается адаптацией радиосети в целом или индивидуальной адаптацией каждой радиолинии. Попытка перебора всевозможных сочетаний различных воздействий на все радиолинии радиосети с целью верификации алгоритмов работы сети в ходе проведения трассовых испытаний практически неосуществима. Продолжительность испытаний для получения достоверной статистики, учитывающий всевозможные сочетания негативных факторов, значительно превышает интервал стационарности электромагнитной обстановки на местности.

Необходимость количественного сравнения эффективности различных алгоритмов адаптации потребовала создания прибора, измеряющего фактические параметры принимаемого сигнала в точке приема во время проведения испытаний. В отличие от известных, предлагаемый прибор в качестве измерительных сигналов использует штатные пакеты и не требует вмешательства в алгоритмы и временные диаграммы радиолинии или радиосети. Измерения ведутся в ходе штатной работы радиосети или радиолинии и основаны на использовании штатных сигнально-кодовых конструкций и помехоустойчивых кодов. Результаты измерений накапливаются для каждого корреспондента и для каждого типа пакета отдельно, на синхронизированных между собой интервалах измерений. В этом случае становится возможным апостериорная оценка эффективности работы различных алгоритмов.

В процессе трассовых испытаний системы пакетной радиосвязи в каждой точке приема производится измерение (оценивание) основных параметров принимаемых сигналов.

На основании полученных оценок рассчитываются ожидаемые в этих условиях вероятностно-временные характеристики системы пакетной радиосвязи. Затем рассчитанные характеристики сравниваются с характеристиками, измеренными экспериментально, и делается вывод об адекватности работы алгоритмов адаптации пакетной радиостанции.

Рассмотрение работы проведём на примере серийной пакетной радиостанции¹. В ней применяются пакеты различной длительности, основные из них приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размер пакетов радиостанции тактического звена

Тип радиостанции	Длина кодового блока, бит	Количество символов, шт.	Длительность пакета для разных скоростей передачи, мс (миллисекунды)
1. Серийная УКВ	384	384 (192)	1.5...320
2. Серийная УКВ	2640	2640 (1320)	10...2200

Дальше примем длину пакета равной 384 символам (соответствует первой строке табл. 1). Для анализа пакетов другой длины можно воспользоваться представленным в статье математическим аппаратом. В общем случае при приеме информации фаза принимаемого сигнала является неизвестным параметром в точке приёма. Различные реализации приемных устройств пакетной радиостанции используют различные способы восстановления начальной фазы сигнала, а некоторые осуществляют некогерентный приём. Для обеспечения независимости измерений от конкретной реализации демодуляторов в предлагаемых алгоритмах получения оценок без потери общности будем использовать огибающую принимаемой смеси сигнала, аддитивного шума и импульсных помех (ИП).

Чтобы получить рассматриваемые параметры, найдём плотность огибающей смеси полезного сигнала, аддитивного гауссова шума и импульсной помехи. Далее под шумом будем понимать аддитивный гауссовый белый шум (АГБШ).

Уточним минимальное отношение сигнал/шум, при котором необходимо получить оценки мощности сигнала, шума и импульсной помехи, для чего оценим сверху помехоустойчивость приема сигналов с относительной фазовой телеграфией (ОФТ), используемой в радиостанции тактического звена. В соответствии с [5], помехоустойчивость на выходе демодулятора в канале с АГБШ определяется следующими выражениями:

для некогерентного приёма однократной ОФТ:

$$P1(x) = 0.5 \cdot e^{-x^2}, \tag{1}$$

для некогерентного приёма двукратной ОФТ:

$$P2(x) = \frac{\sqrt{1+\sqrt{2}}}{\sqrt{2}} \Phi(-x\sqrt{2-\sqrt{2}}), \tag{2}$$

для когерентного приёма однократной и двукратной фазовой телеграфией (ФТ):

$$P3(x) = \Phi(-x\sqrt{2}) \tag{3}$$

где Φ – интеграл Лапласа;

¹Радиостанция Р-168-25У-2. Технические условия ИТНЯ 464511.245-05 ТУ.

$$x = \frac{E_b}{N_0};$$

E_b – энергия на бит;

N_0 – спектральная плотность шума.

Графики помехоустойчивости, рассчитанные по формулам (1)–(3), приведены на рис. 1. В серийной радиостанции тактического звена реализован оптимальный некогерентный демодулятор, помехоустойчивость которого отличается от определяемой выражениями (1) и (2) менее, чем на 1.2 дБ. Использование аналитических выражений для потенциальной помехоустойчивости в дальнейших вычислениях не приводит к заметным погрешностям, но позволяет получить аналитическое решение задачи.

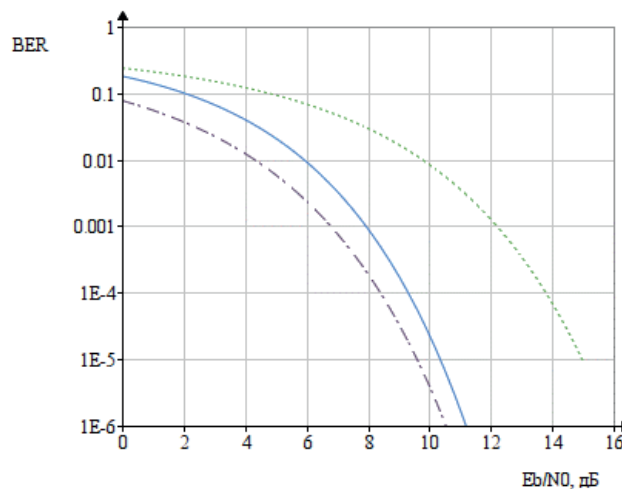


Рис. 1. Зависимость битовой ошибки (bit error rate – BER) от отношения энергии на бит к плотности шума (обозначения кривых см. в тексте).

На рис. 1 сплошной линией обозначена помехоустойчивость некогерентного приёма сигналов в АГБШ с однократной ОФТ, пунктирной линией – некогерентного приёма двукратной ОФТ, штриховой линией – когерентного приёма одно- и двукратной ФТ. По оси абсцисс отложено отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности шума E_b/N_0 в дБ, по оси ординат – вероятность появления битовой ошибки (BER).

Эквивалентная шумовая полоса фильтра основной селекции радиостанций тактического звена равна скорости передачи. Максимальное значение BER на выходе демодулятора, при котором обеспечивается прием сигналов, не должно превышать 0.05. Тогда в соответствии с графиками на рис. 1 отношение среднеквадратичного напряжения сигнала к среднеквадратичному значению шума на входе должно быть не менее 3.6 дБ для некогерентного приёма однократной ОФТ, не менее 4.8 дБ для некогерентного приёма двукратной ОФТ, не менее 1.3 дБ – для когерентного приёма одно- и двукратной ФТ.

В аппаратуре тактического звена применено помехозащищенное кодирование, обладающее следующими свойствами: значение $BER = 0.05$ на входе декодера соответствует вероятности правильного декодирования пакета 0.95, то есть вероятность пакета с ошибкой на выходе декодера (frame error rate – FER) составит не более 0.05. Критерием адаптации вниз по скорости является вероятность правильного декодирования пакета менее 0.5. При этом отношение сигнал/шум на входе демодулятора уменьшается на 1.5 дБ относи-

тельно значения, при котором BER = 0.05. Этот же критерий действует для адаптации по скорости вверх.

Шаг адаптации по скорости и полосе принят равным 2. В соответствии с (1) и (2) для отличающихся в два раза скоростей при одном и том же значении BER помехоустойчивость отличается на 3 дБ. Поэтому адаптация вверх по скорости должна происходить при увеличении отношения сигнал/шум на 1.5 дБ относительно BER = 0.05.

Для используемых в аппаратуре тактического звена сигналов символы пакета имеют одинаковую энергию. Амплитудное значение символа рассматриваемых видов модуляции отличается от среднеквадратичного значения на 3 дБ. Таким образом, для некогерентного приемника двукратной ОФТ с адаптацией по скорости и полосе получим минимальное отношение амплитуды сигнала к эффективному значению шума:

$$SNR2 = SNR1 + K_a - \frac{\Delta SNR}{2} = 8.38 \text{ дБ}$$

и максимальное отношение амплитуды сигнала к эффективному значению шума:

$$SNR3 = SNR1 + K_a + \frac{\Delta SNR}{2} = 11.38 \text{ дБ.}$$

Алгоритм адаптации путем изменения скорости передачи обеспечивает нахождение величины отношения амплитуды сигнала к эффективному значению шума между SNR2 и SNR3 для всех номиналов скоростей, кроме самой высокой скорости передачи. Дальнейший анализ будем проводить для минимальных значений отношения амплитуды сигнала к эффективному значению шума $A_1/\sigma_{ш} = 8.38 \text{ дБ}$.

Определим величину смещения оценки мощности полезного сигнала и шума за счет присутствия в принимаемом сигнале импульсных помех (ИП). Определим, что средним количеством ИП на один пакет χ является количество символов, поражённых ИП, делённое на число символов в пакете. В силу независимости ИП и смеси сигнала и шума смещение оценки λ_1 , получаемое по известному алгоритму:

$$P_c + P_{ш} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \tag{4}$$

составит:

$$\lambda_1 = 10 \cdot \log \left(\frac{(A_1^2 + 1) \cdot (1 - \chi) + (A_{ш}^2 + A_1^2 + 1) \cdot \chi}{A_1^2 + 1} \right), \tag{5}$$

где A_1 – амплитуда полезного сигнала;

$A_{ш}$ – амплитуда импульсной помехи.

Рассчитанное в соответствии с (5) смещение оценки мощности смеси полезного сигнала и шума приведено на рис. 2. Графики на рис. 2 представлены для трёх значений отношения эффективного напряжения ИП $A_{ш}$ к эффективному напряжению полезного сигнала A_1 сплошной: линией показано отношение $A_{ш}/A_1 = 11.6 \text{ дБ}$, пунктирной – $A_{ш}/A_1 = 15.1 \text{ дБ}$, штриховой – $A_{ш}/A_1 = 21.1 \text{ дБ}$. Из представленных графиков видно, что уже при поражении ИП 5% символов $\chi = 0.05$ смещение оценки может достигать 8 дБ.

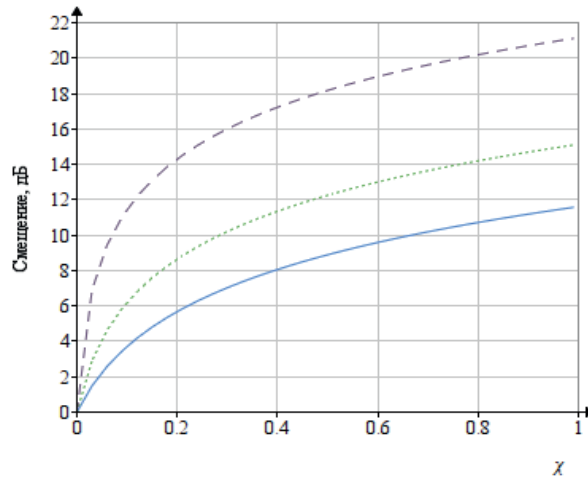


Рис. 2. Смещение оценки суммы мощностей полезного сигнала и шума при среднем количестве ИП χ , в принимаемом пакете информации.

На рис. 3 представлено смещение оценки, получаемой при вычислении мощности смеси полезного сигнала и шума по формуле (5), в зависимости от мощности действующей ИП, при $\chi = 0.1$ – сплошная линия и $\chi = 0.2$ – пунктирная линия.

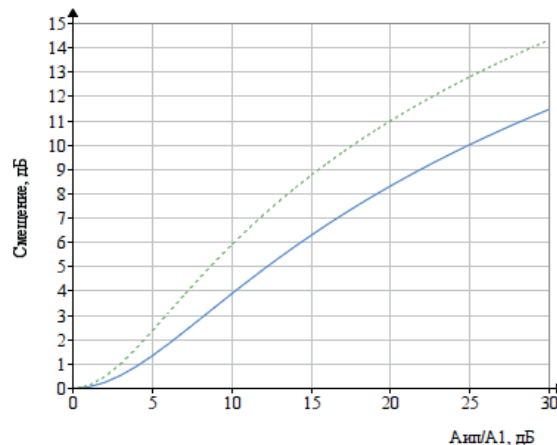


Рис. 3. Смещение оценки эффективного значения огибающей смеси сигнала и шума при различной мощности ИП и заданном значении скважности ИП χ .

Как видно из представленных рис. 2 и 3 графиков, смещение оценок мощности смеси полезного сигнала и шума достигает более 3 дБ при $A_{\text{ип}}/A_1 > 6...8$ дБ. Такие оценки неприемлемы для практического использования.

С целью уменьшения влияния ИП на смещение оценки эффективного значения огибающей смеси полезного сигнала и шума предлагается проведение сепарации (разделения) принимаемых символов в пакете на символы, пораженные ИП и не пораженные ИП. Для этого требуется знание плотности огибающей суммы ИП, сигнала и шума. Данная плотность получена в [6]:

$$W_{I_1} = \frac{1}{N_4} \sum_{i=0}^{N_4-1} \frac{2 \cdot R \cdot i}{N_2 \cdot \sigma^2} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{2 \cdot R \cdot i}{N_2}\right)^2 + A_{0i1}^2}{\sigma^2}} \cdot I_0 \left(\frac{A_{0i1} \cdot \frac{2 \cdot R \cdot i}{N_2}}{\sigma^2} \right), \quad (6)$$

где A_{oi1} – $i1$ -й отсчет амплитуды на входе приёмника (6);

N_2 – количество отсчетов при дискретном представлении искомой плотности;

N_4 – количество отсчетов в дискретном представлении плотности суммы 2-х векторов;

σ – среднееквадратическое значение гауссова шума на входе приемника;

R – размах области дискретного представления полученной плотности [7];

I_0 – функция Бесселя первого вида нулевого порядка.

Используя представленную плотность, в [6] был синтезирован сепаратор, получены вероятностные характеристики его работы, а именно вероятность ложной тревоги и вероятность пропуска ИП.

Для сепарации необходим обнаружитель ИП, например, работающий по критерию Неймана-Пирса. Построение подобных устройств описано в [8]. Получение совместных оценок мощности полезного сигнала и шума, также известно и рассматривается в работе [9]. На основе приведённых в [6, 8, 9] структурных схем и алгоритмов разработано устройство, производящее сепарацию символов на символы, пораженные ИП и символы, не пораженные ИП. Это устройство обеспечивает получение оценок мощности смеси полезного сигнала и шума, мощности ИП, скважности ИП и совместных оценок мощности полезного сигнала и шума. Его структурная схема приведена на рис. 4.

Прибор на рис. 4 работает следующим образом. На вход прибора поступает смесь полезного сигнала, гауссова шума и ИП, обозначенная $s(t)$. Далее в ВО производится вычисление эффективного значения огибающей входного сигнала для каждого символа.

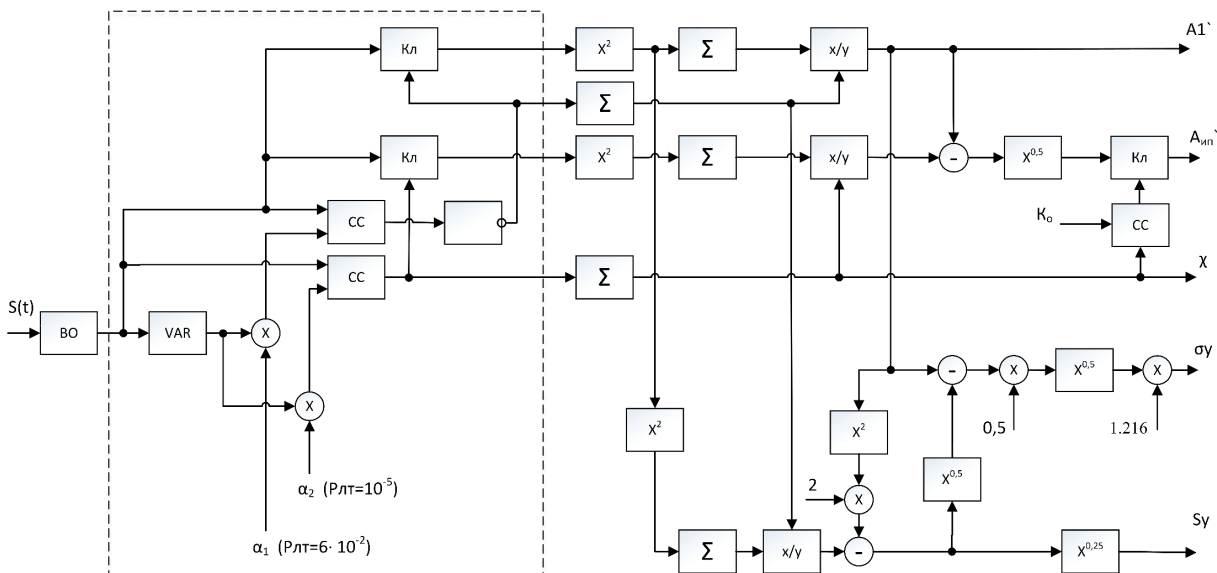


Рис. 4. Структурная схема прибора для измерения параметров принимаемого сигнала в пакетной радиолинии:

ВО – вычислитель огибающей; VAR – устройство взятия порядковой статистики;

X – умножающее устройство; CC – схема сравнения, формирует сигнал с уровнем 1 при превышении сигнала первого входа по сравнению со вторым входом; Кл – управляемый ключ;

X^2 – устройство возведения в квадрат; Σ – накапливающее устройство, вычисляет величину $\sum_{i=1}^N x_i$;

$X^{0.5}$ – устройство извлечения квадратного корня; $X^{0.25}$ – устройство извлечения корня четвертой степени;

x/y – устройство вычисления отношения x к y ; K_0 – константа; “-” – вычитающее устройство.

Вычисление производится по формуле:

$$A(t) = \sqrt{(s(t) \otimes h_s(t))^2 + (s(t) \otimes h_c(t))^2} \quad (8)$$

где $s(t)$ – входной сигнал;

$h_s(t)$ – импульсная характеристика полосового фильтра, интервал корреляции импульсной характеристики соответствует длине символа;

$h_c(t)$ – преобразование Гильберта от $h_s(t)$;

\otimes – операция свертки.

После получения эффективного значения огибающей всех символов принимаемого пакета они сохраняются в памяти, и из них затем формируется вариационный ряд. Заранее определённый член вариационного ряда поступает на умножители, которые формируют пороги умножением на постоянные коэффициенты. Коэффициенты выбираются, исходя из требуемого значения вероятности ложной тревоги. Для первой схемы формирования порога, с помощью которой производится получение оценок мощности ИП, мощности смеси полезного сигнала и шума, этот член вариационного ряда умножается на коэффициент, соответствующий вероятности ложной тревоги $6 \cdot 10^{-2}$. Значение ложной тревоги $6 \cdot 10^{-2}$ выбирается примерно равным значению χ , при котором смещение оценки A_1 будет допустимым. Выше на рис. 2 было показано, что при отношении $A_{\text{ипп}}/A_1 = 11.6$ дБ и $\chi = 0.05$ смещение оценки незначительно и составляет величину примерно 2.5 дБ. Учитывая, что ИП с отношением $A_{\text{ипп}}/A_1 = 11.6$ дБ будут хорошо обнаруживаться в сепараторе [6], выбор вероятности ложной тревоги, равной 0.06, не будет приводить к существенным смещениям оценки.

Для второй схемы формирования порога, с помощью которой производится оценка скважности ошибок χ , эффективного значения огибающей ИП коэффициент, выбирается исходя из смещения значений получаемых оценок. Диапазон оцениваемой величины χ составляет 0.005 до 0.2. Нижний предел обусловлен слабым влиянием количества пораженных ИП символов (менее 0.5%) на помехоустойчивость приема, поскольку протокол передачи рассчитан на работу в условиях $BER = 0.05$. Если предположить, что ИП достаточно мощные и при их появлении каждый бит информации пораженный ИП искажается с вероятностью 0.5, то при числе ИП менее 0.5% вероятность ошибок за счет вклада ИП составит не более 0.25% или 0.0025. Верхний предел ИП обусловлен невозможностью приема при возникновении $BER > 0.1$ за счет вклада ИП. Если задаться наименьшим числом ИП 0.5% ($\chi = 0.005$), то вероятность ложной тревоги, соответствующая значению 10^{-5} , не будет оказывать существенного влияния на оценку χ , так как количество ложных срабатываний схемы сравнения приходящихся на количество правильных срабатываний будет невелико.

Далее на один вход схемы сравнения (СС) поступают эффективные значения огибающей всех символов пакета, а на второй вход – сформированные пороговые значения. При превышении порога схема сравнения вырабатывает сигнал логической единицы, при непревышении порога – сигнал логического нуля. Со второй схемы сравнения сигналы поступают на суммирующее устройство, которое вычисляет количество срабатываний СС. Накопление производится на количестве символов, достаточном для получения статистических характеристик оценок, результат делится на количество обрабатываемых СС

символов. Так формируется оценка параметра скважности ИП χ . С первой схемы сравнения сигнал поступает на логический инвертор и далее на ключевое устройство, которое открывается при наличии на его входе управления логической единицы. На второй вход ключа с выхода вычислителя огибающей ВО поступают эффективные значения огибающей всех символов пакета. Таким образом, на выходе ключевого устройства будут присутствовать только те значения эффективного значения огибающей, которые превысили порог, то есть в которых схема сравнения не обнаружила наличия ИП. Далее эти значения возводятся в квадрат и накапливаются на длине одного пакета. Так получаем суммарную мощность символов, которые не превысили первый порог. Одновременно производится накопление количества срабатываний схемы сравнения СС. Затем в устройстве взятия отношения полученная суммарная мощность делится на число срабатываний СС. На выходе устройства взятия отношений получаем оценку смеси мощности полезного сигнала и шума.

С выхода схемы сравнения логический сигнал поступает на ключевое устройство, которое открывается, если на выходе схемы сравнения будет логическая единица, и также на накапливающее устройство Σ , которое вычисляет количество превышений порога (обнаруженных ИП). С выхода ключевого устройства сигнал возводится в квадрат. В результате получаем мощность смеси полезного сигнала, шума и ИП по символам пакета, в которых обнаружены ИП. С выхода устройства возведения в квадрат результат поступает на накапливающее устройство, с выхода которого поступает на устройство вычисления отношения x/y . На выходе устройства вычисления отношения получаем среднее значение мощности смеси полезного сигнала, шума и ИП. Предполагая, что на длине одного пакета мощность сигнала и шума существенно не меняется, для получения мощности ИП производим вычитание в вычитающем устройстве из оценки мощности смеси полезного сигнала, шума и ИП ранее полученную оценку мощности смеси сигнала и шума. В результате получаем оценку мощности ИП. Для получения эффективного значения огибающей ИП извлекаем из полученной средней мощности корень в устройстве $X^{0.5}$.

При малом количестве ИП представленный алгоритм получения оценки среднеквадратичного значения ИП может формировать недостоверную статистику. Поэтому число обнаруженных ИП сравнивается в схеме сравнения с константой K_0 . Константа K_0 выбирается исходя из условия получения достоверных оценок, обычно более 10. При числе обнаруженных ИП больше K_0 схемой сравнения СС формируется сигнал на открытие ключа с выдачей полученной статистики эффективного значения огибающей ИП потребителю.

Задача получения совместных оценок эффективного значения огибающей полезного сигнала и среднеквадратического значения шума является двухпараметрической задачей получения оценок параметров случайных величин. Для ее решения воспользуемся методом моментов, изложенным в [9]. В рассматриваемом случае отличие состоит в получении оценок эффективного значения огибающей полезного сигнала и среднеквадратического значения шума после проведения процедуры предварительной сепарации символов принимаемого пакета на символы, пораженные ИП и не пораженные ИП. Получение совместных оценок эффективного значения огибающей полезного сигнала A_1 и среднеквадратического значения шума $\sigma_{ш}$ основано на следующих известных формулах [9]:

$$A_c = \sqrt[4]{2 \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4} \quad (9)$$

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sqrt{2 \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4} \right]} \quad (10)$$

где x_i – эффективное значение огибающей символов.

Алгоритм обработки реализуется в соответствии с (9) и (10). Значения мощности смеси полезного сигнала и шума, не превысившие порог (т. е. тех случаев, в которых не было обнаружения ИП), для получения оценки мощности полезного сигнала значения мощности возводятся в квадрат и накапливаются в суммирующем устройстве. Получаем среднее значение квадрата мощности как результат деления сигнала на выходе суммирующего устройства на число символов, амплитуда которых была меньше порога. Одновременно усредненное значение мощности смеси полезного сигнала, полученное ранее, возводится в квадрат и умножается на постоянный коэффициент, равный двум (9). Далее значения мощности сигнала, не превысившие порог, возводятся в устройстве возведения в квадрат и накапливаются в накапливающем устройстве Σ . С выхода накапливающего устройства результат поступает на устройство вычисления отношения x/y . В результате получаем усредненное значение квадрата мощности случайных величин, не превысивших порог. В вычитающем устройстве производится вычитание полученного ранее значения удвоенного квадрата усредненной мощности из усреднённого значения квадрата мощности. Из полученного значения извлекается корень четвертой степени в устройстве вычисления корня четвертой степени $X^{0.25}$ (9). В результате получаем оценку эффективного значения огибающей полезного сигнала. Для получения оценки среднеквадратичного значения составляющей шума из полученного ранее значения на выходе вычитающего устройства извлекается квадратный корень. Далее полученное значение вычитается из значения оценки мощности полезного сигнала. Результат вычитания в устройстве умножения умножаем на постоянный коэффициент 0.5 (10), после чего из результата извлекается квадратный корень (10). Далее оценка корректируется умножением на постоянный коэффициент 1.216. Данный коэффициент определяется на этапе реализации прибора исходя из величины постоянного смещения оценки. Таким образом, получается оценка среднеквадратического значения аддитивной составляющей шума.

Детально работа и полученные характеристики составной части радиостанции тактического звена в части вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска ИП рассмотрены в [6]. В частности, показано, что при отношении ИП к полезному сигналу более, чем на 9 дБ, производится надежная сепарация символов на символы, пораженные ИП и символы не пораженные ИП. Также, учитывая, что смещение оценок при наличии в выборке символов пораженных ИП с отношением $A_{ИП}/A_1 < 6...8$ дБ оказывает незначительное смещение на оценку мощности смеси полезного сигнала и аддитивного шума можно сделать вывод, что использование рассмотренного сепаратора позволит получить близкие к необходимой точности оценки.

В ходе дальнейших исследований предполагается получить количественные характеристики качества работы устройства (смещение и доверительный интервал), изображенного на рис. 4, для следующих оценок:

- эффективного значения огибающей полезного сигнала;

- эффективного значения огибающей импульсных помех (ИП);
- скважности ИП;
- эффективного значения огибающей смеси сигнала и шума;
- среднеквадратичного значения аддитивного шума.

Представленный на рис. 4 прибор предполагается для интеграции в SDR радиостанции типа P168, для получения оценок ИП в ходе эксплуатации аппаратуры P168, которая будет использована в дальнейшем для верификации работы систем адаптации пакетной радиолинии.

Выводы

Для обеспечения корректности и объективного сравнения результатов испытаний различных методов адаптации предложен принцип построения прибора для измерения комплекса параметров импульсных помех, полезного сигнала и шума. Доказано, что получение адекватных оценок мощности смеси полезного сигнала и шума без отбрасывания значений выборки, подверженных воздействию ИП, невозможно. Получены аналитические выражения, позволяющие синтезировать алгоритмы функционирования прибора. Разработана структурная схема прибора. Предложены направления дальнейших исследований для уточнения точностных характеристик.

Литература:

1. Маковий В.А., Голубинский А.Н. Реализованные и потенциально возможные скорости передачи в автоматизированных системах управления и связи // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 2. С. 97–109.
2. Маковий В.А. Построение современных систем радиосвязи КВ-диапазона // Теория и техника радиосвязи. 2009. № 3. С. 76–86.
3. Макаренко С.И., Сапожников В.И., Захаренко Г.И., Федосеев В.Е. Системы связи / Под общ. ред. С.И. Макаренко. Воронеж: Изд. ВАИУ, 2011. 285 с.
4. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th Ed. McGraw-Hill Science, 2007. 1150 p.
5. Чупеев С.А. Обнаружение импульсных помех в радиолиниях // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 4. С. 23–35.
6. Чупеев С.А. Метод расчета вероятностных характеристик на основе дискретного представления плотности вероятности // Радиотехника. 2016. № 5. С. 112–119.
7. Бокк О.Ф., Грибко В.М. Анализ работы блока защиты при воздействии на его вход белого шума // Техника средств связи, сер. ТРС. 1985. Вып. 7. С. 114–121.
8. Яковлева Т.В. Математические методы анализа данных в условиях применимости статистической модели Райса: дис. ... д-ра физ.-мат. М.: ФГБУН ВЦ РАН, 2014. 260 с.

References:

1. Makoviy V.A., Golubinskiy A.N. Realized and potentially-enable transfer rate in automated control and communication systems. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* (Radio Communication Theory and Technology). 2018; (2):97-109. (in Russ.)
2. Makoviy V.A. Construction of modern system of radio communication of SW band.

Teoriya i tekhnika radiosvyazi (Radio Communication Theory and Technology). 2009; (3):76-86. (in Russ.)

3. Makarenko S.I., Sapozhnikov V.I., Zakharenko G.I., Fedoseev V.E. Communication systems. Ed. by S.I. Makarenko. Voronezh: VAIU Publ. (Voronezh Military Aviation Engineering University Publ.), 2011. 285 p. (in Russ.)

4. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th Ed. McGraw-Hill Science, 2007. 1150 p.

5. Chupeev S.A. Impulse noise detection in radio lines. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* (Radio Communication Theory and Technology). 2018; (4):23-35. (in Russ.)

6. Chupeev S.A. Method of calculation of probabilistic characteristics based on discrete representation of frequency distribution. *Radiotekhnika* (Radio Technics). 2016; (5):112-119. (in Russ.)

7. Bokk O.F., Gribko V.M. Analysis of security block operation under the influence of blank noise on its input. *Tekhnika sredstv svyazi, seriya TRS* (Communications equipment, series TRS). Moscow. 1985; (7):114-121. (in Russ.)

8. Yakovleva T.V. Mathematical methods of data analysis under conditions of applicability of statistical model of Rice: D.Sc. (Phys. and Math.) Thesis. FSBI Computation Centre of Russian Academy of Sciences, 2014. 260 p. (in Russ.)

Об авторах:

Беккиев Азрет Юсуфович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, член-корреспондент РАН, заместитель генерального директора АО «Российская электроника» (121357, Россия, г. Москва, Верейская ул., д. 29, стр. 141).

Маковий Владимир Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор научно-технического центра АО «Концерн “Созвездие”» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14).

About the authors:

Azret Yu. Bekkiev, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Ammunition Sciences, Deputy General Director of JSC “Ruselectronics” (29 build., 141, Vereyskaya st., Moscow 121357, Russia).

Vladimir A. Makoviy, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Head of the Technical-Research Centre of JSC “Concern “Sozvezdie” (14, Plekhanovskaya st., Voronezh 394018, Russia).

Для цитирования: Беккиев А.Ю., Маковий В.А. Измерение параметров импульсных помех в пакетной радиолнии // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 28–40. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-28-40

For citation: Bekkiev A.Yu., Makoviy V.A. Impulse noise parameter assessment in a batch radio channel. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):28-40. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-28-40