

УДК 656.259.12

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ПРИЕМНИКАХ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Рассмотрены теоретические основы проектирования микропроцессорных приемников тональных рельсовых цепей, в которых реализуются статистические методы обработки сигнала. Приведены функции правдоподобия и формулы для расчета порога для детекторных и корреляционных приемников амплитудно-модулированного сигнала. Эти соотношения позволяют разрабатывать алгоритмы и программы функционирования решающего устройства приемника рельсовой цепи. Отмечены способы реализации корреляционных приемников средствами цифровой электроники и сбора статистической информации о шумах рельсовой цепи. Обсуждаются вопросы подготовки специалистов для разработки и обслуживания микропроцессорных систем автоблокировки.

Основным направлением повышения безопасности движения поездов на перегонах в настоящее время является внедрение микропроцессорных систем автоблокировки и тональных рельсовых цепей (ТРЦ) [1]. В [1] предложено использовать в приемниках ТРЦ статистические методы обработки сигнала, что позволяет повысить достоверность определения режима ТРЦ и установки показаний проходного светофора. Аналогичные технические решения апробированы в радиолокационных системах (РЛС), к которым предъявляются очень высокие требования по обнаружению слабого сигнала на фоне помех [2, 3]. К сожалению, в [1] вопросы проектирования таких приемников описаны недостаточно подробно для практического применения. Предметом настоящей статьи и является изложение теоретических основ разработки алгоритмов работы приемников ТРЦ этого вида.

Согласно [1], на входе приемника ТРЦ могут действовать следующие типы сигналов: в нормальном режиме ТРЦ – смесь амплитудно-модулированного полезного сигнала ТРЦ и помех; в шунтовом и контрольном режимах – смесь остаточного амплитудно-модулированного сигнала от соседних ТРЦ и помех. Помехи являются аддитивными, флуктуационными. Предполагается, что мультипликативные помехи учтены при проектировании ТРЦ методом наихудших условий; мощные импульсные помехи подавляются схемами защиты. Тогда приемник в силу статистического характера сигнала на входе осуществляет статистическое решение путем проверки статистических гипотез: H_0 – ТРЦ исправна и свободна (состояние S_0); H_1 – ТРЦ или занята или повреждена (состояние S_1).

В теории статистических решений [4] проверка статистических гипотез осуществляется на основе решающего правила: $\Lambda \leq h$ – принимается гипотеза H_1 ; $\Lambda > h$ – принимается гипотеза H_0 , где Λ – функция правдоподобия; h – порог.

С позиций технической кибернетики работа приемника ТРЦ может рассматриваться как распознавание состояния рельсовой цепи S_0 или S_1 методами статисти-

ческих решений [5]. Следовательно, для проектирования приемника ТРЦ необходимо иметь выражение для функции правдоподобия и правило вычисления порога.

В [1] обоснован выбор порога для приемников ТРЦ по критерию Неймана – Пирсона [4, 6] с учетом того, что в системах автоблокировки нормируется вероятность пропуска состояния S_1 . Другими словами, нормируется вероятность превышения шумом некоторого порога (рисунок 1).

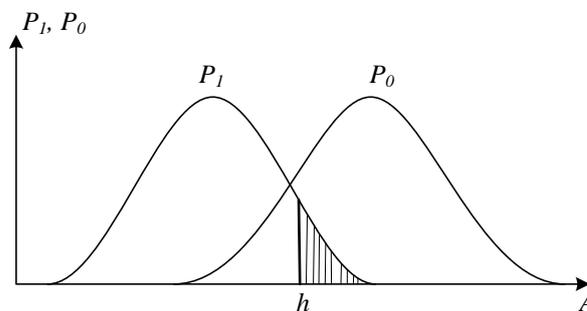


Рисунок 1 – Принцип назначения порога по критерию Неймана – Пирсона

Рассмотрим приемник ТРЦ, в котором реализовано микропроцессорное решающее устройство (РУ), принимающее решение о наличии демодулированного сигнала на выходе синхронного либо линейного демодулятора [1]. Эти методы демодуляции хорошо известны из теории радиотехнических цепей [7–9]. Аналогичное техническое решение существует в цифровых РЛС [2]. Следует указать, что имеется возможность осуществить и цифровую демодуляцию [10], но это может потребовать сложных алгоритмов и значительных вычислительных ресурсов.

Так как микропроцессорная система работает с отсчетами принимаемого сигнала, то функция правдоподобия для такого РУ [2, 6]

$$\Lambda = \prod_{i=1}^n \frac{P_0 \varphi_i}{P_1 \psi_i} \quad (1)$$

где n – число отсчетов; A_i – значение отсчета, В; P_0 – плотность вероятности смеси «сигнал/шум», P_1 – плотность вероятности шума.

Доказано [6–8], что при линейном детектировании на выходе детектора распределение плотности вероятности смеси «сигнал/шум» подчиняется закону Рэлея – Райса

$$P_0(A) = \frac{A}{\sigma_{\text{сш}}^2} \exp\left(-\frac{A^2 + S_m^2}{2\sigma_{\text{сш}}^2}\right) I_0\left(\frac{AS_m}{\sigma_{\text{сш}}}\right), \quad (2)$$

где A – значение принятого напряжения, В; $\sigma_{\text{сш}}$ – дисперсия смеси «сигнал/шум», S_m – амплитудная огибающая детектируемого сигнала, В; I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Распределение плотности шума на выходе того же детектора подчиняется закону Рэлея

$$P_1(A) = \frac{A}{\sigma_{\text{ш}}^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_{\text{ш}}}\right), \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{ш}}$ – дисперсия шума.

После подстановки (2) и (3) в (1) и преобразований получается функция правдоподобия

$$\Lambda = \prod_{i=1}^n \frac{\sigma_{\text{ш}}^2}{\sigma_{\text{сш}}^2} \exp\left(-\frac{A_i^2 + S_m^2}{2\sigma_{\text{сш}}^2} + \frac{A_i^2}{2\sigma_{\text{ш}}}\right) \times I_0\left(\frac{A_i S_m}{\sigma_{\text{сш}}}\right). \quad (4)$$

По рисунку 1 порог срабатывания и вероятность пропуска состояния S_1 связаны соотношением

$$P_{\text{пр}} = \int_h^{\infty} P_1(A) dA. \quad (5)$$

После подстановки (3) в (5), интегрирования и преобразований получается формула для определения порога

$$h = \sigma_{\text{ш}} \sqrt{2 \ln \frac{1}{P_{\text{пр}}}}, \quad (6)$$

В [8] показано, что при синхронном детектировании плотность вероятности смеси «сигнал/шум» подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием

$$\mu = 0,5 U_m U_r \cos(\varphi_c - \varphi_r)$$

и дисперсией

$$\sigma_{\text{сш}} = \frac{1}{16} U_r^2 \sigma$$

где U_m – амплитуда сигнала, В; U_r – амплитуда несущей, В; φ_c – начальная фаза сигнала, рад; φ_r – начальная фаза несущей, рад; σ – дисперсия шума на входе приемника.

Плотность вероятности шума в этом случае подчиняется нормальному закону с нулевым математическим ожиданием. Дисперсия же вычисляется по указанной выше формуле. Тогда, после подстановки в (1) выражений нормального закона с приведенными выше параметрами при учете того, что дисперсия смеси «сигнал/шум» не равна дисперсии шума, получается функция правдоподобия

$$\Lambda = \prod_{i=1}^n \frac{\sigma_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{сш}}} \exp\left(-\frac{A_i - \mu}{2\sigma_{\text{сш}}^2} + \frac{A_i^2}{2\sigma_{\text{ш}}^2}\right). \quad (7)$$

Подстановкой в (5) нормального закона плотности распределения шума на основании рисунка 1 получается формула для расчета порога срабатывания

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{h}{\sigma_{\text{ш}}}\right), \quad (8)$$

где Φ – интеграл вероятности.

Другим возможным техническим решением при обработке ТРЦ является применение корреляционного приемника. В [1, 4] показано, что в этом случае функция правдоподобия для достаточно большого числа модулированных сигналов и флуктуационной аддитивной помехи имеет вид

$$\Lambda = \frac{\exp\left(-\int_0^T \frac{y(t) s(t)}{\sigma_{\text{сш}}} dt\right)}{\exp\left(-\int_0^T \frac{n(t)}{\sigma_{\text{ш}}} dt\right)}, \quad (9)$$

где T – период сигнала, с; $y(t)$ – смесь «сигнал/шум»; $s(t)$ – известный сигнал; $n(t)$ – шум.

После преобразования из (9) получается решающее правило:

$$\int_0^T y(t) s(t) dt \geq z_0; \quad (10)$$

$$z_0 = E_0 + \frac{\sigma_{\text{сш}}}{2} \ln h - \frac{\sigma_{\text{сш}} - \sigma_{\text{ш}}}{2} \Delta f, \quad (11)$$

где E_0 – энергия сигнала, Дж; Δf – полоса частот сигнала, Гц.

Значение порога в формуле (11) вычисляется из (8).

Таким образом, для реализации такого приемника требуется коррелятор, осуществляющий перемножение и интегрирование сигнала. В [3] указывается, что допустима реализация умножения цифровым перемножителем и интегрирования – цифровым сумматором с памятью. Эти узлы реализуются в микропроцессорной системе.

Приведенные выражения для решающих правил, функций правдоподобия и порога распознавания дают возможность решить следующие задачи проектирования ТРЦ:

1 Выбор типа приемника. Сравнительный анализ описанных выше методов обработки сигналов в приемниках ТРЦ показывает, что корреляционные приемники отличаются наибольшей сложностью алгоритмов и затрат вычислительных ресурсов. Алгоритм функционирования микропроцессорного РУ при синхронном детектировании наиболее прост, так как не требует вычисления функции Бесселя. Но в аппаратной части требуются высококачественные фильтры для подавления высших гармоник после детектора [7, 8].

2 Определение перечня исходных данных для работы РУ и числовых величин этих данных.

3 Разработка алгоритма и программы работы РУ в части реализации вычисления значения выбранной функции правдоподобия, сравнения его с порогом и выработки управляющих сигналов.

Кроме того при проектировании аппаратуры сигнальной точки автоблокировки может быть предусмотрена функция сбора статистической информации для определения законов распределения плотности вероятности шума в ТРЦ и параметров этих законов. Такие измерения необходимы для решения задачи адаптации приемников ТРЦ к реальным условиям эксплуатации. Необходимость проведения указанных измерений неоднократно обсуждалась в публикациях по проектированию и эксплуатации систем железнодорожной автоматики [11, 12].

Представляется полезным на основании результатов статьи высказать некоторые соображения о подготовке специалистов по железнодорожной автоматике и телемеханике с учетом тенденций развития систем автоблокировки. При изучении теоретических основ связи, во-первых, необходимо изучение случайных процессов, помех и их воздействия на прием сигналов с различными типами модуляции [1, 7]. Во-вторых, требуется подробное изучение корреляционных методов приема сигналов с обязательным описанием схемной реализации этих методов. При освоении курса технической кибернетики следует уделять большее внимание статистическим методам распознавания по различным критериям, не ограничиваясь байесовским подходом и подходом по Нейману – Пирсону. Такое наполнение курсов обеспечит необходимую подготовку студентов для проектирования и эксплуатации современных систем автоблокировки.

В заключение допустимо сделать вывод, что представленные в статье теоретические сведения позволяют

решать актуальные вопросы проектирования микропроцессорных приемников ТРЦ, подготовки соответствующих специалистов к решению этой задачи и поэтому имеют большое значение для работы конструкторских и учебных заведений железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Лисенков, В. М. Методы анализа и синтеза рельсовых цепей (статистический подход) / В. М. Лисенков. – М. : ВИНТИ РАН, 2014. – 202 с.
2. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М. : Радио и связь, 1986. – 351 с.
3. Проектирование радиолокационных приемных устройств / А. П. Голубков [и др.]; под ред. М. А. Соколова. – М. : Высшая школа, 1985. – 335 с.
4. Тихонов, В. М. Оптимальный прием сигналов / В. М. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.
5. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – М. : Высшая школа, 1989. – 231 с.
6. Горяинов А. Г. Статистическая радиотехника: примеры и задачи / А. Г. Горяинов, А. Г. Журавлев, В. И. Тихонов. – М. : Сов. радио, 1980. – 543 с.
7. Иванов, М. Т. Радиотехнические цепи и сигналы / М. Т. Иванов, А. Б. Сергеев, В. Н. Ушаков. – СПб. : Питер, 2014. – 336 с.
8. Ключев, Л. Л. Теория электрической связи / Л. Л. Ключев. – Минск : Технопринт, 2008. – 429 с.
9. Горелов, Г. В. Каналообразующие устройства железнодорожной автоматики и связи / Г. В. Горелов, А. А. Волков, В. И. Шелухин. – М. : Транспорт, 1994. – 239 с.
10. Сергеев, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергеев. – СПб. : Питер, 2003. – 608 с.
11. Костромин, А. П. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / А. П. Костромин. – М. : Транспорт, 1997. – 192 с.
12. Бочков, К. А. Вероятностный метод определения уровня ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость : тр. Междунар. семинара / Белорус. гос. ун-т. трансп. – Гомель : БелГУТ, 2003. – С. 35–42.

Получено 15.06.2017

D. V. Komnatny Theoretical foundations of statistical signal processing algorithms in tone track circuits microprocessor receivers designing.

The aim of this article is foundations consideration of tone track circuits microprocessor receivers design, in which statistical methods of signal processing are realized. Likelihood functions and threshold calculation formulas for detector and correlator receivers of amplitude-modulated signals are adduced. These formulas allow to design algorithms and programs for resolve device of tone track circuit receivers. The methods of correlator receiver realization by digital electronics and gathering of ststistical information about track circuit noise are mentioned. The questions of specialists in the field of microprocessor block signaling development and maintenance training are discussed too.