УДК 621.391:681.518 DOI: 10.18664/ikszt.v0i5.55748

АНАНЬЕВА О.М., к.т.н., доцент кафедры электротехники и электрических машин,
ДАВИДЕНКО М.Г., к.т.н., доцент кафедры электротехники и электрических машин (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

Прием сигналов АЛСН в условиях действия двухкомпонентной помехи

Внедрение на железнодорожном транспорте скоростного движения поездов вызывает необходимость решения задачи совершенствования существующих систем АЛСН, которые в значительной мере подвержены влиянию электромагнитных помех различного происхождения. Поэтому целью работы является теоретическое обоснование общей структуры оптимального приема сигналов АЛСН в условиях действия двухкомпонентной помехи. Показано, что в системе АЛСН перед приемником стоит задача различения четырех возможных сигналов З, Ж, КЖ и О («отсутствие сигнала») на фоне помех. Для того, чтобы численно описать ущерб от неверного различения сигналов, в работе введена функция потерь. Приведено описание общей структуры приемника при условии, что в основу вычисления среднего риска положена простая функция потерь, присваивающая нулевую величину потерь правильным решениям и единичную величину потерь – любому неправильному решению. Представлена общая структура оптимального приемника, которая представляет собой совокупность вычислителей функций правдоподобия, хранилища величин априорных вероятностей, и устройства сравнения. Конкретизация вида функции правдоподобия применительно к действующим сигналам и помехам позволяет перейти от общего алгоритма к конкретным техническим решениям, обеспечивающим его реализацию.

Ключевые слова: *система АЛСН, канал связи, двухкомпонентная помеха, функция потерь, приемник, функция правдоподобия.*

Введение

Одной из основных задач железнодорожного транспорта является удовлетворение потребностей в перевозках грузов и пассажиров при обеспечении безопасности движения поездов. Одним из эффективных путей решения этой задачи является совершенствование существующих систем автоматического управления подвижным составом.

Постановка задачи

При скоростном и высокоскоростном движении на безопасность железнодорожного транспорта значительно влияет надежная работа существующих систем интервального регулирование движения поездов, а также устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН). В настоящее время в системах АЛСН передача сигнальной информации осуществляется по индуктивному каналу связи между рельсовой линией и локомотивными катушками, что отрицательно влияет на качество приема числовых кодов за счет наличия в нем электромагнитных помех различного происхождения [1, 2]. Поэтому целью работы является теоретическое обоснование общей структуры оптимального приема сигналов АЛСН в условиях действия двухкомпонентной помехи.

Анализ исследований

В роботах [1, 2] рассмотрены математические модели канала передачи сигналов АЛСН и временные характеристики тока шунта и электродвижущей силы катушек локомотивного приемника. Корреляционному приему сигналов числовых кодов АЛСН посвящены работы [3, 4]. Анализ существующих методов и средств передачи сигналов числовых кодов АЛСН показывает, что на надежность работы канала связи существенно влияют электромагнитные помехи и скорость движения поездов. В связи с этим возникает необходимость в исследовании методов и средств приема сигналов АЛСН в условиях действия помех.

Основной материал

Теоретическое обоснование общей структуры приемника сигналов АЛСН в условиях действия двухкомпонентной помехи.

В системе АЛСН перед приемником стоит задача различения четырех возможных сигналов З, Ж, КЖ и О («отсутствие сигнала») на фоне помех. В теории статистических решений для того, чтобы численно описать ущерб от неверного различения сигналов, вводят так называемую функцию потерь $r\left(\hat{\vec{\lambda}}, \vec{\lambda}\right)$, где $\vec{\lambda}$ – векторный параметр, представляющий собой вектор истинных величин параметров; $\hat{\vec{\lambda}}$ – решение, состоящее в числовой оценке параметра $\vec{\lambda}$ [5 - 7]. Средняя величина потерь R (средний риск) является числовой мерой несовершенства выбранного правила принятия решений [7, 8].

$$R = \iint\limits_{\Lambda\hat{\Lambda}} r\left(\hat{\vec{\lambda}},\lambda\right)\cdot p\left(\hat{\vec{\lambda}},\lambda\right) d\hat{\vec{\lambda}}\, d\lambda. \qquad (1)$$

Здесь Λ – пространство значений параметра $\vec{\lambda}$; $\hat{\Lambda}$ – пространство решений $\hat{\vec{\lambda}}$ относительно значения параметра $\vec{\lambda}$; $p\left(\hat{\vec{\lambda}},\vec{\lambda}\right)$ – совместная плотность вероятности принятия конкретного решения $\hat{\vec{\lambda}}$ относительно конкретной истинной величины $\vec{\lambda}$.

Решающее правило (т. е. такое правило, которое формирует решения $\hat{\vec{\lambda}}$ на основе анализа принятой смеси сигнала и помех, обеспечивающее минимум величины среднего риска R (1), называют байесовским решающим правилом. Для построения такого правила необходимо задать множество различаемых сигналов и функцию потерь. При этом формула (1) для среднего риска преобразуется к виду [7]

$$R = \sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} r\left(\hat{\vec{\lambda}}^{(m)},\vec{\lambda}^{(l)}\right)\cdot P\left(\hat{\vec{\lambda}}^{(m)},\vec{\lambda}^{(l)}\right), \qquad (2)$$

где M – количество различаемых сигналов; $\vec{\lambda}^{(n)}$ – информационный параметр, определяющий n - й различаемый сигнал.

В АЛСН различаемых сигналов четыре (включая и случай отсутствия сигнала). Выясним сначала, какой будет общая структура приемника, если в основу вычисления среднего риска положить простую функцию потерь, присваивающую нулевую величину потерь правильным решениям и единичную величину потерь – любому неправильному решению [7]:

$$r\left(\hat{\vec{\lambda}}^{(m)},\vec{\lambda}^{(l)}\right) = 1-\delta_{ml};\;\; m,l = 1,2,3,4, \qquad (3)$$

где $\delta_{ml} = \begin{cases} 0, & m=l \\ 1, & m\neq l. \end{cases}$

Известно [5, 7], что в этом случае решающее правило таково:

$$\hat{\vec{\lambda}} = \hat{\vec{\lambda}}^{(D)},\;\; \text{если } P\left(\vec{\lambda}^{(D)}|\vec{u}\right) = \max_{l}\left\{P\left(\vec{\lambda}^{(l)}|\vec{u}\right)\right\} \qquad (4)$$

где $\vec{u} = (u_1,\ u_2,\dots,\ u_k,\dots,\ u_K)$ – принятая в обработку реализация смеси сигнала и помех;

$P\left(\vec{\lambda}^{(l)}|\vec{u}\right)$ – апостериорная вероятность параметра $\vec{\lambda}^{(l)}$.

Решение (4) называют решением по максимуму апостериорной вероятности. Воспользовавшись известным равенством $P(\vec{\lambda}|\vec{u})\cdot p(u) = P(\vec{\lambda})\cdot p(\vec{u}|\vec{\lambda})$, это решение можно путем умножения обеих частей равенства (4) на неотрицательную величину $p(\vec{u})$ привести к виду

$$\hat{\vec{\lambda}} = \hat{\vec{\lambda}}^{(D)},\ \text{если}$$
$$P\left(\hat{\vec{\lambda}}^{(D)}\right)\cdot p\left(\vec{u}|\hat{\vec{\lambda}}^{(D)}\right) = \max_{l}\left\{P\left(\hat{\vec{\lambda}}^{(l)}\right)\cdot p\left(\vec{u}|\hat{\vec{\lambda}}^{(l)}\right)\right\} \qquad (5)$$

Здесь $P\left(\vec{\lambda}^{(l)}\right)$ – априорная вероятность приема сигнала, определяемого параметром $\vec{\lambda}^{(l)}$; $p(\vec{u},\ \vec{\lambda})$ – функция правдоподобия. Таким образом, общая структура оптимального приемника представляет собой совокупность вычислителей функций правдоподобия, хранилища величин априорных вероятностей, и устройства сравнения. Конкретизация вида функции правдоподобия применительно к действующим сигналам и помехам позволяет перейти от общего алгоритма (5) к конкретным техническим решениям, обеспечивающим его реализацию.

Прием сигнала в условиях действия двухкомпонентной помехи с независимыми отсчетами.

Пусть сигнал $s(t,\vec{\lambda})$ наблюдается на фоне помехи $n(t)$, представляющей сумму двух независимых компонент

$$n(t) = n_1(t) + n_2(t). \qquad (6)$$

Это означает, что входное напряжение приемника равно

$$u(t) = s(t,\vec{\lambda}) + n_1(t) + n_2(t). \qquad (7)$$

Обозначим

$$u_1(t) = s(t,\vec{\lambda}) + n_1(t),$$
$$u_2(t) = n_2(t), \qquad (8)$$

тогда выражение (7) приобретает вид

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t). \qquad (9)$$

Пусть это напряжение равномерно продискретизировано по времени и пусть известна совместная условная плотность вероятности $p(u_{1k},u_{2k}|\vec{\lambda})$, где $u_k = u(t_k)$. Ввиду независимости процессов $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеем

$$p(u_{1k},u_{2k}|\vec{\lambda}) = p_{U1}(u_{1k}|\vec{\lambda}) \cdot p_{U2}(u_{2k}). \qquad (10)$$

Известно [6], что плотность вероятности суммы двух независимых случайных величин может быть выражена через их плотности вероятности как

$$p(u_k|\vec{\lambda}) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{U1}(u_k - u_{2k}|\vec{\lambda}) \cdot p_{U2}(u_{2k})\, du_{2k}. \qquad (11)$$

Представим функцию $p_{U1}(u_k|\vec{\lambda})$ рядом Тейлора по s в окрестности точки s_k:

$$p_{U1}(u_k|\vec{\lambda}) \approx p_{U1}(s_k) + p'_{U1}(s_k)\cdot(u_k - s_k) + 0{,}5p''_{U1}(s_k)\cdot(u_k - s_k)^2,$$

где

$$p'_{U1}(s_k) = \frac{dp_{U1}(u_k|\vec{\lambda})}{ds_k(\vec{\lambda})}, \quad p''_{U1}(s_k) = \frac{d^2p(u_k|\vec{\lambda})}{ds_k^2(\vec{\lambda})}.$$

Поскольку s_k обычно является модой функции правдоподобия, то первая производная в этой точке обращается в нуль.

Кроме того, в силу равенства (8) имеем, что $p_{U1}(s_k) = p_{n1}(0)$. Следовательно

$$p_{U1}(u_k|\vec{\lambda}) \approx p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot(u_k - s_k)^2, \qquad (12)$$

где $p_{n1}(x)$ – плотность распределения вероятностей помехи $n_1(t)$.

Из (12) следует, что

$$p_{U1}(u_k - u_{2k}|\vec{\lambda}) \approx p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot(u_k - s_k - u_{2k})^2.$$

Подставим это выражение в (11):

$$p(u_k|\vec{\lambda}) \approx \int_{-\infty}^{\infty} [p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot(u_k - s_k - u_{2k})^2]\cdot p_{U2}(u_{2k})du_{2k} =$$

$$= p_{n1}(0)\int_{-\infty}^{\infty} p_{U2}(u_{2k})du_{2k} + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot\int_{-\infty}^{\infty} p_{U2}(u_{2k})(u_k - s_k - u_{2k})^2 du_{2k}.$$

В этом выражении первый интеграл равен единице. Учтя это, а также произведя возведение в квадрат под знаком второго интеграла, получим:

$$p(u_k|\vec{\lambda}) = p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\int_{-\infty}^{\infty} p_{U2}(u_{2k})[(u_k - s_k)^2 - 2(u_k - s_k)u_{2k} +$$

$$u_{2k}^2]du_{2k} = p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\left[(u_k - s_k)^2\int_{-\infty}^{\infty} p_{U2}(u_{2k})du_{2k} -\right.$$

$$\left.-2(u_k - s_k)\int_{-\infty}^{\infty} u_{2k}p_{U2}(u_{2k})du_{2k} + \int_{-\infty}^{\infty} u_{2k}^2 p_{U2}(u_{2k})du_{2k}\right].$$

В квадратных скобках первый интеграл равен единице, второй интеграл равен нулю (т. к. процесс $u_2(t)$ не имеет постоянной составляющей), третий интеграл представляет собой дисперсию σ_2^2 величины u_{2k} (и стационарного процесса $u_2(t)$). С учетом этого

$$p(u_k|\vec{\lambda}) = p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot\sigma_2^2 + 0{,}5p''_{n1}(0)(u_k - s_k)^2. \tag{13}$$

Выполнив возведение в квадрат, получим

$$p(u_k|\vec{\lambda}) = p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot\sigma_2^2 + 0{,}5p''_{n1}(0)(u_k^2 + s_k^2) - p''_{n1}(0)u_k s_k = \\ = C + 0{,}5p''_{n1}(0)(u_k^2 + s_k^2) - p''_{n1}(0)u_k s_k, \tag{14}$$

где $C = p_{n1}(0) + 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot\sigma_2^2$. (15)

Введя обозначение

$$\alpha_k = [0{,}5p''_{n1}(0)(u_k^2 + s_k^2) - p''_{n1}(0)u_k s_k]/C,$$

приведем выражение (14) к виду

$$p(u_k|\vec{\lambda}) = C\cdot(1+\alpha_k). \tag{16}$$

Если дискретизация по времени выполнена с таким шагом, что отсчеты u_k независимы, то функция правдоподобия всей наблюдаемой реализации $\vec{u}$ входного напряжения приемника есть

$$p(\vec{u}|\vec{\lambda}) = p(u_1|\vec{\lambda})\cdot p(u_2|\vec{\lambda})\cdot\ldots\cdot p(u_K|\vec{\lambda}) = \\ = C^K(1+\alpha_1+\alpha_2+\cdots+\alpha_K+\Sigma_k), \tag{17}$$

где Σ_k представляет собой сумму перекрестных произведений величин α_k. Пренебрегая этими произведениями вблизи максимума функции правдоподобия имеем

$$p(\vec{u}|\vec{\lambda}) \approx C^K\cdot\left(1+\sum_{k=1}^{K}\alpha_k\right) = \\ = C^K + C^{K-1}\cdot 0{,}5p''_{n1}(0)\cdot\left(\sum_{k=1}^{K}u_k^2 + \sum_{k=1}^{K}s_k^2 - 2\sum_{k=1}^{K}u_k s_k\right). \tag{18}$$

Поскольку $\sum_{k=1}^{K}u_k^2$ есть величина энергии принятой реализации, не зависящая от $\vec{\lambda}$, то выражение (18) можно переписать в виде

$$p(\vec{u}|\vec{\lambda}) = C + 0{,}5C^{K-1}p''_{n1}(0)\sum_{k-1}^{K}s_k^2(\vec{\lambda}) - C^{K-1}p''_{n1}(0)\sum_{k-1}^{K}u_k s_k(\vec{\lambda}). \tag{19}$$

Вывод

Решающее правило (5) реализуется на базе вычисления корреляционных сумм и энергии каждого из различаемых сигналов, коэффициенты C, при которых определяются статистические характеристики обеих помех. Собственно, в учете величин этих коэффициентов и состоит отличие полученного результата от широко известного корреляционного способа приема [3,4,7-9]. Такие решения, базирующиеся на совместном использовании (5) и (19) в минимальной степени учитывает характер помехи $u_2(t)$ – только через ее дисперсию σ_2^2, входящую в коэффициент C.

Литература

1. Математична модель каналу передачі сигналів числових кодів АЛСН [Текст] / М.М. Бабаєв, О.М. Ананьєва, М.Г. Давиденко, В.О. Сотник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 134. – С. 187-198.
2. Часові характеристики струму шунта та електрорушійної сили локомотивних котушок системи АЛСН [Текст] / Ананьєва О.М., Давиденко М.Г., Сотник В.О., Бабаєв М.М. // Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту. Вип.127.- Х.: УкрДАЗТ, 2011. – С.56-78
3. Аналіз кореляційних залежностей для синтезу приймача кодів АЛСН [Текст] / В.О. Сотник, М.М. Бабаєв, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 34. – С. 49-56.
4. Нейромережева модель розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН [Текст] / В.О. Сотник, М.М. Бабаєв, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 36. – С. 67-78.
5. Тартаковский, Г.П. Теория информационных систем [Текст] / Г.П. Тартаковский. – М.: Физматкнига, 2005. – 304 с.
6. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст] / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.

7. Долькович, С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст] С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
8. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации [Текст] / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
9. Першин, В.Т. Основы радиоэлектроники [Текст] / В.Т. Першин. – Минск: Вышэйшая школа, 2006. – 400 с.

Ананьєва О.М., Давиденко М.Г. Приймання сигналів АЛСН в умовах дії двокомпонентної завади. Впровадження на залізничному транспорті швидкісного руху поїздів викликає необхідність розв'язку завдання вдосконалювання існуючих систем АЛСН, які значною мірою піддані впливу електромагнітних завад різного походження. Тому метою роботи є теоретичне обґрунтування загальної структури оптимального приймання сигналів АЛСН в умовах дії двокомпонентної завади. Показано, що в системі АЛСН перед приймачем стає завдання розрізнення чотирьох можливих сигналів З, Ж, КЖ і О («відсутність сигналу») на тлі завад. Для того, щоб чисельно описати збиток від невірного розрізнення сигналів, у роботі введена функція втрат. Наведено опис загальної структури приймача за умови, що в основу обчислення середнього ризику покладена проста функція втрат, що привласнює нульову величину втрат правильним розв'язкам і одиничну величину втрат – будь-якому неправильному розв'язку. Представлена загальна структура оптимального приймача, яка являє собою сукупність обчислювачів функцій правдоподібності, сховища величин апріорних імовірностей, і обладнання порівняння. Конкретизація виду функції правдоподібності стосовно до діючих сигналів і перешкодам дозволяє перейти від загального алгоритму до конкретних технічних розв'язків, що забезпечують його реалізацію.
Ключові слова: система АЛСН, канал зв'язку, двокомпонентна завада, функція втрат, приймач, функція правдоподібності.

Anan'yeva O.M., Davidenko M.G. The reception of the signals of continuous automatic cab signaling (CACS) under the conditions of two-component interference effect. The introduction of high-speed traffic on railways necessitates the solution of the task of perfecting the existing CACS systems which to a large extent are affected by electromagnetic interferences of different origin. That is why the purpose of the work is theoretical grounding of the whole structure of optimal CACS signal reception under the conditions of two-component interference effect. It has been shown that in the CACS system the receiver must recognize four possible signals G, Y, RY and A ("absence of signal") against a background of interferences. A loss function has been introduced to describe the damage from incorrect recognition of signals numerically. The description of a receiver overall structure under the condition that mean risk calculations were founded on a simple loss function binding a zero loss value to correct solutions and a single loss value to any wrong solution has been given. An optimal receiver overall structure which is a set of likelihood function calculators, a storage of a priori probability values and compare facilities has been presented. The concretization of a likelihood function type as applied to the actuating signals and interferences allows going over from general algorithm to specific technical solutions ensuring its implementation.
Key words: CACS system, communication channel, two-component interference, loss function, receiver, likelihood function.

Рецензент д.т.н., профессор Бабаев М.М. (УкрГУЖТ)

Поступила 08.09.2015 г.

Ананьева О.М., *кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, Украина. Тел.: (057) 730-19-96*
Давиденко М.Г., *кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, Украина. Тел.: (057) 730-19-96*

Anan'yeva O. M., *Candidate of Technical Sciences, associate professor of electrical equipment and electrical machines Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine. Ph.: (057) 730-19-96*
Davidenko M. G., *Candidate of Technical Sciences, associate professor of electrical equipment and electrical machines Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine. Ph.: (057) 730-19-96*