

# ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 517.9

А.С. Попов, О.Н. Киселев, А.С. Корсунский

## ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ КАК ЗАДАЧА ОБНАРУЖЕНИЯ-РАЗЛИЧЕНИЯ

**Попов Андрей Сергеевич**, окончил Рязанский государственный радиотехнический университет. Адъюнкт кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Военной академии связи им. С.М. Буденного. Имеет статьи в области обработки сигналов, статистической теории принятия решений, а также передачи информации по беспроводным каналам связи информационных систем. [e-mail: koks85230@mail.ru].

**Киселев Олег Николаевич**, окончил Рязанское высшее военное командное училище связи. Доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Военной академии связи им. С.М. Буденного. Имеет учебные пособия и статьи в области теории электрической связи и цифровой обработки сигналов. [e-mail: kisel1979@mail.ru].

**Корсунский Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, окончил факультет радиосвязи Ульяновского филиала Военного университета связи, адъюнктуру Военной академии связи им. С.М. Буденного. Ведущий инженер-программист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи и изобретения в области радиоэлектронной защиты, безопасности связи и информации, а также передачи информации по беспроводным каналам связи информационно-коммуникационных систем. [e-mail: aksspb@mail.ru].

### Аннотация

Рассмотрены вопросы многоальтернативного обнаружения-различения импульсных сверхширокополосных сигналов с точки зрения задачи проверки гипотез. Получено математическое описание выходной статистики радиолинии, позволяющее реализовать алгоритмы различения множества сигналов (абонентов), основанное на оценке максимального правдоподобия.

Ключевые слова: многоальтернативное обнаружение-различение, импульсные сверхширокополосные сигналы, функционал отношения правдоподобия.

**Andrey Sergeevich Popov**, graduated from Ryazan State Radioengineering University; post-graduate student at the chair 'General Disciplines' of the Military Communications Academy named after S. Budenny; author of articles in the field of signal processing, statistic decision-making theory as well as data transmission through wireless data links of information systems. e-mail: koks85230@mail.ru.

**Oleg Nikolaevich Kiselev**, graduated from Ryazan Higher Military Command Communications College; Associate Professor at the chair 'General Disciplines' of the Military Communications Academy named after S. Budenny; author of textbooks and articles in the field of theory of electrical link and digital processing of signals. e-mail: kisel1979@mail.ru.

**Andrey Sergeevich Korsunsky**, Candidate of Engineering, graduated from the Faculty of Radio-Communications of Ulyanovsk branch of the Military Communications University; finished his post-graduate studies at the Military Communications Academy named after S. Budenny; lead programmer at Federal Research-and-Production Center 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of articles and inventions in the field of radioelectronic protection,

communications and information security as well as data transmission through wireless communications channels of infotelecommunication systems. e-mail: aksspb@mail.ru.

Abstract

The article deals with issues of multi-choice detection/identification of impulse broadband signals from the point of view of a task of hypothesis proof. The authors have got a mathematical description of output radioline statistics, which enables the implementation of discrimination algorithms for a signal (subscriber) set based on evaluation of maximum likelihood.

Key words: multi-choice detection/identification, impulse broadband signals, functional of likelihood ratio.

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах связи к наиболее актуальным относится проблема разрешения противоречий, связанных с одновременным обеспечением многоканальности и множественного доступа при заданном уровне помехозащищенности [1]. Одним из направлений разрешения данной проблемы является применение технологии импульсной сверхширокополосной (ИСШП) связи, которое стало практически реализуемым благодаря внедрению в современные средства радиосвязи быстродействующей микропроцессорной техники и новейшей элементной базы, позволяющей производить обработку ИСШП сигналов (ИСШПС) [2].

При построении радиосистем передачи информации на основе ИСШПС необходимо учитывать проблему обнаружения и распознавания сигналов. Именно на начальном этапе важно получить качественные показатели обнаружения, поскольку некачественное обнаружение может ограничить все дальнейшие усилия, направленные на вхождение системы радиосвязи в синхронизм. Задача совместного обнаружения-различения сигналов от многих пользователей состоит в следующем: полагается, что на входе приемной системы либо присутствует один из  $M$  полезных сигналов, либо сигнала нет. Приемное устройство должно производить совместно следующие процедуры: обнаружение сигналов, различение сигналов, а также оценку их информационных параметров.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ-РАЗЛИЧЕНИЯ

Задачи синтеза оптимальных алгоритмов многоальтернативного обнаружения-различения были строго сформулированы и детально разработаны в байесовской

постановке для случая полной априорной информации относительно статистических характеристик каналов, сигналов и помех. Однако при этом вероятности появления обнаруживаемых сигналов полагаются известными. Это обстоятельство существенно ограничивает практическое использование получаемых результатов, поскольку в реальных системах радиосвязи вероятности появления обнаруживаемых сигналов не известны. В результате при синтезе алгоритмов неприемлемыми оказываются как байесовская концепция минимума среднего риска, так и минимаксный подход.

Предположим, что на интервале  $[0, T_H]$  наблюдается процесс:

$$x(t) = \begin{cases} n(t), \\ s_m(t, \vec{\lambda}_{0m}) + n(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $m = 1, \dots, M$ ,

$t \in [0, T_H]$ ,

$s_m(t)$  – один из возможных сигналов в канале  $m$ ,

$\lambda_{0m}$  – истинное значение неизвестного параметра сигнала,

$n(t)$  – белый гауссовский шум с нулевым средним значением и спектральной плотностью мощности  $N_0/2$ .

При решении традиционных задач различения сигналов или оценивания их параметров необходимо переходить к непрерывным наблюдениям. Такой переход оказывается возможным, если наблюдаемые данные входят в соотношения только через статистику отношения правдоподобия. В этом случае в результате предельного перехода отношение правдоподобия просто заменяют функционалом отношения правдоподобия (ФОП). ФОП для каждого сигнала в смеси (1) записывается в следующем виде (индекс  $m$  для упрощения записи опущен) [3]:

$$\bar{\Lambda}(\vec{\lambda}) = \exp \left\{ \int_0^{T_H} \int_0^{T_H} x(t_1) s(t_2, \vec{\lambda}) \theta(t_1, t_2) dt_1 dt_2 - \frac{1}{2} \int_0^{T_H} \int_0^{T_H} s(t_1, \vec{\lambda}) s(t_2, \vec{\lambda}) \theta(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \right\}, \quad (2)$$

где функция  $\theta(t_1, t_2)$  определяется из следующего интегрального уравнения

$$\int_0^{T_H} K_{\eta}(t_1, t) \theta(t, t_2) dt = \sigma(t_1 - t_2),$$

где  $K_{\eta}(t_1, t_2)$  – функция корреляции шума. Для рассматриваемого случая белого шума  $K_{\eta}(t_1, t_2) = (N_0 / 2) \delta(t_1 - t_2)$ .

Часто более удобным оказывается запись ФОП с помощью функции:

$$v(t, \vec{\lambda}) = \int_0^{T_H} s(t_1, \vec{\lambda}) \theta(t_1, t) dt_1, \quad (4)$$

которая является решением интегрального уравнения

$$\int_0^{T_H} K_{\eta}(t_1, t) v(t_1, \vec{\lambda}) dt_1 = s(t, \vec{\lambda}). \quad (5)$$

Используя функцию  $v(t, \bar{\lambda})$ , выражение для ФОП (2) можно переписать в виде:

$$\hat{\Lambda}(\bar{\lambda}) = \exp \left\{ \int_0^{T_H} x(t)v(t, \bar{\lambda})dt - \frac{1}{2} \int_0^{T_H} s(t, \bar{\lambda})v(t, \bar{\lambda})dt \right\}, \quad (6)$$

$$\hat{\Lambda}(\bar{\lambda}) = \exp(\hat{L}(\bar{\lambda})) = \exp(L(\bar{\lambda}) - Q(\bar{\lambda})/2), \quad (7)$$

где  $L(\bar{\lambda})$  зависит от принятой реализации рассматриваемого процесса  $x(t)$  и называется достаточной статистикой, а  $Q(\bar{\lambda})$  – отношение сигнал/шум на выходе оптимального приемника.

Для рассматриваемого случая белого шума  $m =$

$$\hat{\Lambda}(\bar{\lambda}) = \exp \left\{ \frac{2}{N_0} \int_0^{T_H} x(t)s(t, \bar{\lambda})dt - \frac{1}{2} Q(\bar{\lambda}) \right\}. \quad (8)$$

Подставляя реализацию входного процесса, можно переписать выражение для  $\hat{L}(\bar{\lambda})$  через сигнальную и шумовую функцию [3]:

$$\hat{L}(\bar{\lambda}) = \hat{S}(\bar{\lambda}, \bar{\lambda}_0) + \hat{N}(\bar{\lambda}) - Q(\bar{\lambda})/2, \quad (9)$$

где  $\hat{S}(\bar{\lambda}, \bar{\lambda}_0) = \int_0^{T_H} s(t, \bar{\lambda}_0)v(t, \bar{\lambda})dt$  представляет собой

сигнальную функцию, а  $\hat{N}(\bar{\lambda}) = \int_0^{T_H} n(t)v(t, \bar{\lambda})dt$  – шумовую функцию.

Введем в рассмотрение нормированную сигнальную и шумовую функции:

$$S(\bar{\lambda}, \bar{\lambda}_0) = \hat{S}(\bar{\lambda}, \bar{\lambda}_0) \cdot z^2, \quad (10)$$

$$N(\bar{\lambda}) = \hat{N}(\bar{\lambda}) \cdot z^{-1}, \quad (11)$$

где  $z$  – отношение сигнал/шум в системе.

Тогда выражение для логарифма ФОП можно записать:

$$\hat{L}(\bar{\lambda}) = z^2 S(\bar{\lambda}_0, \lambda) + zN(\bar{\lambda}) - Q(\bar{\lambda})/2. \quad (12)$$

На основе наблюдения и анализа принятой реализации  $s(t)$  необходимо принять одну из  $M + 1$  гипотез  $\Theta_0, \Theta_1, \dots, \Theta_M$  и отклонить остальные. Применительно к задаче совместного обнаружения-различения это означает, что необходимо вынести решение о наличии или отсутствии полезного сигнала на входе приемника, а также, при наличии сигнала, определить какой из  $M$  возможных сигналов присутствует на входе приемника [4].

На пространстве наблюдений должны быть заданы функции правдоподобия  $W(x/\Theta_m)$ ,  $m = 0, \dots, M$ . Известны, кроме того, априорные вероятности гипотез  $P_k = P\{\Theta_k\}$ ,  $m = 0, \dots, M$ ,  $\sum_m P_m = 1$ . Пространство

решений состоит из  $M + 1$  элементов  $\gamma_m$ ,  $m = 0, \dots, M$ , где  $\gamma_m$  – решение принять гипотезу  $\Theta_m$ . При наличии всех

указанных априорных данных можно использовать байесовский алгоритм. При этом необходимо минимизировать средний риск:

$$R = \sum_{k=0}^M \sum_{m=0}^M p_m \iint C_{km}(\gamma_k, \bar{\lambda}_m) \hat{\Lambda}_m(\bar{\lambda}_m) W_m(\bar{\lambda}_m) d\bar{\lambda}_m dx. \quad (13)$$

Определение характеристик байесовских оценок (БО) алгоритма представляет собой сложную задачу, решение которой для систем ИСШПС в известных источниках отсутствует. Даже если оценка ищется в традиционных условиях наблюдения (при наличии сигнала с вероятностью, равной единице), найти характеристики байесовской оценки параметров, нелинейно закодированных в сигнале, как правило, не удается. Кроме того, как уже отмечалось ранее, при практическом использовании байесовского алгоритма имеют место существенные трудности. К ним относятся: априорная неопределенность, произвольность выбора потерь, невозможность выразить качество функционирования системы одним показателем и сложность технической реализации. Поэтому рассмотрим возможность применения предельной формы БО – оценки максимального правдоподобия (ОМП). Основная цель метода – это максимизация функции правдоподобия  $\hat{L}_m(\bar{\lambda}_m)$ .

При увеличении отношения сигнал/шум и при некоторых предположениях относительно аналитических свойств функций, входящих в выражение для риска, можно получить следующее асимптотически оптимальное правило принятия решения [5]:

$$\sup \hat{L}_m(\bar{\lambda}_m) > h_m, \quad (14)$$

$$\sup_{\bar{\lambda}_m} \hat{L}_m(\bar{\lambda}_m) - \sup_{\bar{\lambda}_k} \hat{L}_k(\bar{\lambda}_k) > h_{mk},$$

$$k, m = 1, \dots, M \quad (15)$$

Для симметричной системы сигналов  $P_m = P$ ,  $Q_m(\bar{\lambda}) = const = z^2$ ,  $h_{mk} = 0$ . Таким образом, алгоритм совместного обнаружения-различения может быть упрощен и записан как:

$$\sup_{\bar{\lambda}_m} \hat{L}_m(\bar{\lambda}_m) > h, \quad (16)$$

$$\sup_{\lambda} \hat{L}_m(\bar{\lambda}_m) > \sup_{\bar{\lambda}_k} \hat{L}_k(\bar{\lambda}_k), k, m = 1, \dots, M. \quad (17)$$

Отсюда следует, что необходимо найти величины абсолютных максимумов логарифмов функционалов отношения правдоподобия  $\hat{L}_m(\bar{\lambda}_m)$  на выходе всех  $M$  каналов приемной системы, сравнить их между собой и с некоторым порогом  $h$ .

Решение о наличии  $m$ -го сигнала выносится при одновременном выполнении обоих неравенств. Если  $\sup_{\bar{\lambda}_m} \hat{L}_m(\bar{\lambda}_m) < h$ , то выносится решение об отсутствии какого-либо полезного сигнала на выходе приемной системы. Порог  $h$  выбирается исходя из заданного критерия оптимальности.

Рассмотрим соотношение (17), напомним эквивалентное ему соотношение через достаточную статистику

$$\sup_{\bar{\lambda}_m} \frac{L_m(\bar{\lambda}_m)}{z} > h', \quad (18)$$

$$\sup_{\bar{\lambda}_m} \frac{L_m(\bar{\lambda}_m)}{z} > \sup_{\bar{\lambda}_k} \frac{L_k(\bar{\lambda}_k)}{z}, k, m = 1, \dots, M, \quad (19)$$

где  $h' = \frac{h}{z} + \frac{z}{2}$ .

Таким образом, в алгоритме совместного обнаружения-различения ИСШП сигналов от многих пользователей вместо вычисления логарифма отношения правдоподобия можно перейти к вычислению достаточной статистики, что может быть удобно при вычислении характеристик алгоритма. Так же следует отметить простоту технической реализации предложенного алгоритма, который позволит использовать многоэтапный поиск вместо традиционных время затратных последовательных и параллельных методов поиска сигнала. Это объясняется простотой накопления и сравнения выходных статистик канала: вычисляемые поочередно значения  $\hat{L}_m(\tau)$  (или  $L_m(\tau)/z$ ) для разных ячеек не сравниваются между собой, значение  $\hat{L}_m(\tau_i)$  (или  $L_m(\tau_i)/z$ ) для  $i$ -й ячейки, не превысившее порог, при анализе  $(i + 1)$ -й ячейки не используется, что уменьшает объем требуемой памяти, а соответственно и подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшие исследования полученных результатов, в свою очередь, составят основу для разработки предложений по совершенствованию и практической реализации предложенного алгоритма обнаружения-различения, с целью повышения эффективности систем ИСШП связи. Перспективной целью исследований в данном направлении является повышение требования к тактико-техническим характеристикам систем и производительности программно-аппаратных комплексов, позволяющих реализовывать алгоритмы обработки ИСШПС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураченко Д.Л. Оптимальное разделение цифровых сигналов многих пользователей в линиях и сетях связи в условиях помех. – Л. : ВАС, 1990. – 302 с.
2. Попов А.С., Юров Ю.Ю. Использование сверхширокополосных сигналов для персональных беспроводных компьютерных сетей // Материалы 34-й всерос. науч.-техн. конф. Ч.1. – Рязань : РВВКУС, 2009. – С. 52–54.
3. Трифонов А.П. Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с.
4. Кулонен Г.А. Статистическая теория оценивания параметров и проверки статистических гипотез. – Л. : ВАС, 1981. – 152 с.
5. Радченко Ю.С. Статистические методы сжатия, восстановления и обработки сигналов в информационных системах: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. – Воронеж, 2004. – 351 с.