

УДК 621.391,621.396

Д. Ю. Голоменцев, В. А. Пахотин, К. В. Власова,
С. В. Молостова

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ С НЕОРТОГОНАЛЬНЫМИ НЕСУЩИМИ ЧАСТОТАМИ

42

Представлен алгоритм решения задачи разрешения сигналов в системах связи с неортогональными несущими частотами. Основой являются положения теории оптимального приема в приложении к системам связи. Показано, что система уравнений правдоподобия позволяет решить для систем связи задачу разрешения сигналов в области их неортогональности. Показано, что решение задачи разрешения сигналов в системах связи можно свести к задаче фильтрации с оригинальными импульсными и частотными характеристиками.

The algorithm of the solution of the task of permission of signals in communication systems with not orthogonal carrier frequencies is provided. A basis are provisions of the theory of optimum reception in the annex to communication systems. It is shown that the system of equations of credibility allows to solve for communication systems the problem of permission of signals in the field of their nonorthogonality. It is shown that the solution of the task of permission of signals in communication systems can be consolidated to the task of filtering with original pulse and frequency responses.

Ключевые слова: разрешение сигналов, неортогональные несущие частоты, теория оптимального приема, системы связи.

Key words: the permission of signals, not orthogonal carrier frequencies, the theory of optimum reception, communication systems.

Введение

В настоящее время в связи с развитием систем связи, систем телевидения отмечается острый дефицит частотных полос. Так, например, в системах наземного эфирного телевидения переход на новый стандарт DVB-T2 обусловлен в первую очередь требованием обеспечить увеличение скорости передачи информации на 30%. Это оказывается возможным за счет сжатия информации, увеличения количества ортогональных поднесущих частот с 8 до 32 К, увеличения сигнального созвездия с 64-QAM до 256-QAM. При этом основой потока информации является радиоимпульс длительностью T , характеризующийся круговой частотой ω , начальной фазой φ_0 и амплитудой U_0 . В потоке сообщений эти три параметра случайны. Они меняются при переходе от одного временного интервала длительностью T к другому. Длительность



интервала T определяет необходимую для передачи этого радиоимпульса полосу частот $\Delta f = 2/T$. Амплитудно-фазовая модуляция QAM создает N независимых состояний радиоимпульсов, отличающихся амплитудой или фазой. Ортогональные поднесущие OFDM обеспечивают N_1 независимых каналов передачи данных. Интервал между частотами $\Delta f_1 = 1/T$. В результате предельная скорость передачи информации будет определяться выражением

$$C = \Delta f \log_2(N)^{N_1} = \Delta f N_1 \log_2(N).$$

Из этого следует, что амплитудно-фазовая модуляция QAM увеличивает скорость передачи информации в соответствии с логарифмической зависимостью. При этом помехоустойчивость системы связи может уменьшаться. Это связано с возможным уменьшением векторного расстояния между смежными векторами – сигналами на фазовой плоскости. Увеличение количества ортогональных поднесущих N_1 приводит к увеличению частотной полосы в N_1 раз. Общая частотная полоса системы связи будет при этом равна $\Delta F = N_1 \Delta f$. Следует отметить, что возможности сжатия информации, возможности QAM модуляции, возможности увеличения количества поднесущих в системах связи в системах наземного телевидения практически исчерпаны. Поэтому чрезвычайно актуальны разработки, связанные с принципиально новыми технологиями уплотнения частотной полосы, увеличения скорости передачи сообщений в системах связи, в системах телевидения. В полной мере это относится к работам по исследованию возможностей использования неортогональных поднесущих в системах связи. В этом случае частотное различие между поднесущими меньше, чем $\Delta f = 1/T$. Следовательно, в той же отведенной полосе частот возможно создание большего количества поднесущих, что увеличивает скорость передачи информации. Основой для развития работ в данном направлении являются результаты научных исследований, проведенных в БФУ им. И. Канта по разрешению неортогональных сигналов [1; 2], а также работы [3; 4], в которых подтверждается возможность создания систем связи с неортогональными поднесущими.

Основы теории

Рассмотрим систему связи, содержащую N_1 несущих частот. Пусть система модуляции определена сигнальным созвездием N – QAM. Следовательно, на каждом интервале обработки T формируется принятое сообщение

$$\hat{Y}(t) = \sum_{n=1}^{N_1} \hat{U}_n \exp(i\omega_n t) + \hat{U}_w(t), \quad (1)$$

где \hat{U}_n – комплексная амплитуда одного сигнала созвездия на n -частоте; ω_n – круговая частота; $\hat{U}_w(t)$ – аддитивный шум, квадратурные



компоненты которого распределены нормально, с дисперсией σ^2 , средним значением, равным нулю, и интервалом корреляции τ_k . Интервал корреляции равен дискретности отсчетов $\tau_k = \Delta t$. Следовательно, по существу используется модель дискретного белого шума [5].

Согласно (1) основной задачей на интервале обработки T является задача разрешения (фильтрации) N_1 радиоимпульсов с известными частотами и неизвестными комплексными амплитудами. Запишем на основании (1) логарифм функции правдоподобия в интегральном виде. Исключим постоянную составляющую, не участвующую в процессе оптимизации функции правдоподобия

$$\ln(L(\bar{\lambda}')) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T \left| \hat{Y}(t) - \sum_{n=1}^{N_1} \hat{U}'_n \exp(i\omega_n t) \right|^2 dt, \quad (2)$$

где штрихами отмечены неизвестные оцениваемые параметры сигнала \hat{U}'_n ; $\bar{\lambda}'$ – вектор оцениваемых параметров сигнала.

Функция правдоподобия представляет собой условную плотность распределения параметров сигнала с одним максимумом, который определяет наиболее правдоподобные оценки параметров. В связи с этим для минимизации (2) получим уравнения правдоподобия, дифференцируя (2) по \hat{U}'_n и приравнявая дифференциалы к нулю

$$\int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_n t} dt = \sum_{n=1}^{N_1} \hat{U}'_n \int_0^T e^{-i(\omega_n - \omega_k) t} dt.$$

Меняя индекс k в пределах $k = 1 \div N_1$, можно получить полную систему уравнений правдоподобия. Запишем ее в матричном виде следующим образом:

$$\bar{\beta} = \hat{A} \hat{U}', \quad (3)$$

где $\hat{\beta}_n = \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_n t} dt$ – компоненты вектора $\bar{\beta}$; \hat{U}'_n – компоненты оце-

ниваемого вектора \hat{U}' ; \hat{A} – корреляционная матрица, состоящая из коэффициентов корреляции между частотными составляющими $\alpha_{n,k} = \int_0^T e^{-i(\omega_n - \omega_k) t} dt$. Решая матричное уравнение (3), можно получить

оцениваемые комплексные амплитуды \hat{U}'_n

$$\hat{U}' = \hat{A}^{-1} \bar{\beta}. \quad (4)$$

Если ввести $\bar{\hat{x}}$ с компонентами $\bar{\hat{x}} = \exp(-i\omega_n t)$, то на основании (4) можно записать выражение для вектора импульсных характеристик

$$\bar{\hat{h}} = (\hat{h}_1, \dots, \hat{h}_{N_1})^T = \hat{A}^{-1} \bar{\hat{x}}. \quad (5)$$



Более того, используя преобразование Фурье, можно получить частотные характеристики фильтров

$$G(\omega) = \hat{A}^{-1} \bar{z}, \quad (6)$$

где $\hat{z}_n = \int_0^T \exp(i(\omega - \omega_n)t) dt$ — компоненты \bar{z} , зависящие от частоты ω .

Приведем в качестве примера явные выражения для (3)–(6) для случая двух частотных составляющих. Уравнения правдоподобия (3) в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_1 t} dt &= \hat{U}'_1 + \hat{R} \hat{U}'_2, \\ \frac{1}{T} \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_2 t} dt &= \hat{R}^* \hat{U}'_1 + \hat{U}'_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\hat{R} = \frac{1}{T} \int_0^T e^{i(\omega_2 - \omega_1)t} dt$. Решая (7) относительно \hat{U}'_1 , \hat{U}'_2 , получим

$$\begin{aligned} \hat{U}'_1 &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_1 t} dt - \hat{R} \frac{1}{T} \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_2 t} dt}{1 - |\hat{R}|^2}, \\ \hat{U}'_2 &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_2 t} dt - \hat{R}^* \frac{1}{T} \int_0^T \hat{Y}(t) e^{-i\omega_1 t} dt}{1 - |\hat{R}|^2}. \end{aligned}$$

Импульсные характеристики для двух фильтров будут определены выражениями

$$\hat{h}_1 = \frac{e^{-i\omega_1 t} - \hat{R} e^{-i\omega_2 t}}{1 - |\hat{R}|^2}, \quad \hat{h}_2 = \frac{e^{-i\omega_2 t} - \hat{R}^* e^{-i\omega_1 t}}{1 - |\hat{R}|^2}.$$

Частотные характеристики фильтров будут определены выражениями

$$\hat{G}_1(\omega) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T e^{i(\omega - \omega_1)t} dt - \hat{R} \frac{1}{T} \int_0^T e^{i(\omega - \omega_2)t} dt}{1 - |\hat{R}|^2}, \quad \hat{G}_2(\omega) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T e^{i(\omega - \omega_2)t} dt - \hat{R}^* \frac{1}{T} \int_0^T e^{i(\omega - \omega_1)t} dt}{1 - |\hat{R}|^2}.$$

При $|\hat{R}| = 0$ импульсные и частотные характеристики фильтров преобразуются в импульсные и частотные характеристики Фурье-фильтров. Если $\omega = \omega_1$, то $\hat{G}_1(\omega = \omega_1) = 1$ и $\hat{G}_2(\omega = \omega_2) = 0$. Если



$\omega = \omega_2$, то $\hat{G}_1(\omega = \omega_1) = 0$ и $\hat{G}_2(\omega = \omega_2) = 1$. Следовательно, фильтры с такими частотными характеристиками пропускают согласованный сигнал с коэффициентом единица и сопутствующий сигнал с коэффициентом ноль. Они представляют собой новый вид фильтров с полным подавлением сопутствующего сигнала.

Заключение

В настоящей работе представлены положения теории систем связи с неортогональными несущими частотами. Выведены основные выражения, определяющие фильтрацию неортогональных составляющих в системах связи. Показано, что процесс обработки сигналов может быть представлен в виде фильтрации данных фильтрами с оригинальными импульсными и частотными характеристиками.

Список литературы

1. Пахотин В. А., Власова К. В., Бессонов В. А. и др. Технология цифровой обработки простых и широкополосных сигналов на основе функционала правдоподобия // DSPA-16 : матер. 18-й Междунар. конф. 2016. Т. 1. С. 345–349.
2. Пахотин В. А., Бессонов В. А., Власова К. В. Метод обработки ионосферных сигналов // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. 2011. №4. С. 55–60.
3. Слюсар В. И., Васильев К. А. Потенциальные границы частотного уплотнения сигналов N-OFDM на основе базисных функций Хартли // Там же. 2003. №7. С. 30–39.
4. Слюсар В. И., Смоляр В. Г. Частотное уплотнение каналов связи на основе сверхрелеевого разрешения сигналов // Там же. 2008. №3. С. 21–27.
5. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. М., 2003.

Об авторах

Дмитрий Юрьевич Голоменцев – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VPakhotin@kantianf.ru

Валерий Анатольевич Пахотин – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VPakhotin@kantianf.ru

Ксения Валерьевна Власова – канд. физ.-мат. наук, доц. Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Калининград.

E-mail: p_ksenia@mail.ru

Светлана Валерьевна Молостова – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VPakhotin@kantianf.ru

About the authors

Dmitry Golomentsev – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VPakhotin@kantianf.ru



Prof. Valerij Pakhotin – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VPakhotin@kantianf.ru

Dr Kseniya Vlasova – Ass. Prof., BSAFF, Kaliningrad.
E-mail: p_ksenia@mail.ru

Prof. Svetlana Molostova – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VPakhotin@kantianf.ru

УДК 281.5.015

Д. В. Березкин

47

СЕМИОТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Предложен семиотический подход к проектированию информационных систем в области безопасности, основанный на извлечении знаний из слабоструктурированных источников. Рассмотрены вопросы выработки оптимальных вариантов по предотвращению угроз для систем поддержки принятия решений. Предложена методика постоянного мониторинга текстовых сообщений, выявления событий и ситуаций, выработки сценариев возможного развития кризисных ситуаций.

The paper is devoted to issues of semiotic approach for the design of information security systems, based on knowledge extraction from semi-structured sources. The problems of developing of optimal variants for the prevention of threats to decision support systems. The technique continuous monitoring of text messages, identify the events and situations and develop scenarios possible development of crisis situations is proposed.

Ключевые слова: семиотические системы, модели рисков и угроз, извлечение знаний, искусственный интеллект, системы поддержки принятия решений, экспертные системы.

Key words: semiotic systems, risk and threats models, knowledge extraction, artificial intelligence, decision support systems, expert systems.

Введение

В современном мире возрастает актуальность различных решений задач, связанных с обеспечением безопасности, которые охватывают все сферы общественной жизни. В связи с усложнением технологий современного производства, совершенствованием вооружения, обострением конфликтов в ряде регионов мира появляются новые угрозы безопасности, которые часто трудно прогнозировать. Тенденция к глобализации современного мира приводит к тому, что региональные угрозы в какой-то сфере могут быстро распространяться на другие регионы и влиять на процессы в совершенно иных областях общественной жизни