

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический  
университет»**

**Кафедра радиотехники**

**ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ  
В СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к проведению практических занятий №3-4  
для студентов бакалавриата  
направления 11.03.01 «Радиотехника»  
очной формы обучения**

**Воронеж 2021**

УДК 621.37  
ББК 32.84

**Составитель**  
д-р техн. наук А. Б. Токарев

**Обработка сигналов в системах радиомониторинга:** методические указания к проведению практических занятий №3-4 для студентов бакалавриата направления 11.03.01 «Радиотехника» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. Б. Токарев. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 34 с.

Содержат краткие теоретические сведения о работе систем радиомониторинга, образцовые задачи и набор индивидуальных расчетных заданий для проведения практических занятий со студентами бакалавриата направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") очной формы обучения, изучающих дисциплину «Обработка сигналов в системах радиомониторинга».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «РТ\_ПЗ\_34\_Системы\_радиомониторинга.pdf»

Ил. 8. Табл. 20. Библиогр.: 6 назв.

**УДК 621.37**  
**ББК 32.84**

**Рецензент** – А.В. Башкиров, д-р техн. наук, зав. кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие современных средств связи и радиотехнических систем различного назначения влечет заметное усложнение радиообстановки и необходимость контроля за использованием спектра, умения выявлять источники радиоизлучения (ИРИ) и оценивать параметры подобных излучений. Дисциплина «Обработка сигналов в системах радиомониторинга» нацелена на изучение и освоение подходов и алгоритмов, используемых в данной области.

В рамках цикла практических занятий предполагается ознакомление с вопросами анализа радиообстановки в широких полосах частот, алгоритмами одноканального и многоканального обнаружения радиосигналов, а также с расчетом показателей, характеризующих эффективность работы средств и систем радиомониторинга.

Основная часть практических занятий предполагает предварительное изучение относящихся к осваиваемым вопросам теоретических основ по лекциям, настоящим методическим указаниям и по упоминаемым здесь сторонним источникам, после чего следует рассмотреть и проанализировать предлагаемые способы решения типовых задач. В завершении каждого практического занятия необходимо решить две задачи из подраздела «Индивидуальные контрольные задания» к соответствующей теме. Подлежащие решению задачи определяются самим студентом на основе его номера в списке группы по следующему правилу: «студенты с номерами 1...10 решают задачи №1 и №2, с номерами 11..20 – задачи №2 и №3, студенты с номерами 21...30 – задачи №3 и №4, а если студентов более 30, то все последующие студенты решают задачи №1 и №4».

Завершающие занятия по дисциплине опираются на стороннее программное обеспечение, носят факультативный характер и необходимость их выполнения согласовывается с преподавателем индивидуально.

# **1. АНАЛИЗ РАДИООБСТАНОВКИ В ШИРОКИХ ПОЛОСАХ ЧАСТОТ И МЕТОДЫ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Назначением систем радиомониторинга (СРМ) является:

- анализ радиобстановки, т.е. получение информации о работающих в определённой местности (или на объектах) передатчиках, определение их типа, основных характеристик, количества и расположения;
- контроль за радиоэлектронными средствами, предназначенными для передачи (излучения) электромагнитных волн различных диапазонов, с целью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) различных средств связи, выполнения санитарных норм и законодательных ограничений;
- обнаружение, наблюдение, перехват и обработка данных, полученных при помощи средств радиомониторинга.

Более подробно вопросы назначения и типовые задачи, решаемые СРМ, обсуждаются в разделе 1 методических указаний [1].

## **2. Особенности и показатели качества работы цифровых анализаторов спектра**

Эффективными инструментами, помогающими операторам систем радиомониторинга производить «ручной» анализ радиобстановки в широких полосах частот, являются цифровые анализаторы спектра. Информацию об особенностях работы, параметрах и показателях эффективности использования цифровых спектроанализаторов при решении задач радиомониторинга можно найти в разделе 2 методических указаний [1].

### **3. Разделение отсчетов спектра на сигнальные и шумовые при известной интенсивности фонового шума**

Основой автоматизированного выявления сигналов, действующих в широких полосах частот, служат те же принципы, которые лежат в основе функционирования цифровых анализаторов спектра, но для минимизации вероятностей ошибок необходимо учитывать, как минимум следующие специфические особенности, характеризующие подлежащие обработке реальные сигналы:

1) непосредственная дискретизация сигналов на радиочастоте, как минимум, нецелесообразна, поэтому формирование последовательности отсчетов сигнала должно предусматривать перенос сигнала по частоте;

2) реальные фильтры, используемые для подготовки сигналов к дискретизации, обладают относительно широкими полосами расфильтровки, поэтому поиск отсчетов спектров сигналов следует осуществлять в суженной частотной области, где степень сужения определяется прямоугольностью АЧХ фильтра, подготавливающего обрабатываемые выборки к дискретизации;

3) при подготовке выборок к БПФ применение взвешивания сигналов (уже упоминавшееся в предыдущем разделе) является необходимым, т.к. отличия уровней подлежащих обнаружению сигналов может составлять десятки децибел, что делает недопустимым расчет спектра просто по фрагменту выборки (т.е. с использованием, фактически, прямоугольного окна).

#### **3.1. Теоретические основы**

В современных системах радиомониторинга (СРМ) подлежащий обработке случайный процесс в тракте приёма часто переносится на промежуточную ( $IF$ ) частоту. После дискретизации с интервалом  $T$  взвешенная выборка процесса  $u_{IF}(t)$

преобразуется в спектральную область при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ)

$$\dot{c}(n) = \frac{1}{N_{IF}} \cdot \sum_{k=0}^{N_{IF}-1} w(k) \cdot u_{IF}(kT) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \frac{nk}{N_{IF}}}, \quad (3.1)$$

где  $n$  – номер спектрального отсчета,  $k$  – номер отсчета во временной выборке,  $T$  – интервал дискретизации,  $u_{IF}(kT)$  – отсчеты преобразуемой в спектральную область выборки,  $N_{IF}$  – объем этой выборки,  $w(\cdot)$  – применяемая для корректировки свойств спектра весовая функция.

При обнаружении сигналов с помощью одноканальной аппаратуры фазы спектральных составляющих, как правило, оказываются неинформативными и алгоритмы обнаружения (разрешения) сигналов строятся в расчете на обработку совокупности отсчетов энергетического спектра

$$X_R(n) = \frac{1}{R} \cdot \sum_{r=1}^R \left| \dot{c}_{(r)}(n) \right|^2, \quad (3.2)$$

где  $R$  – число выборок, по которым производилось усреднение,  $\dot{c}_{(r)}(n)$  – совокупность спектральных отсчетов, полученных в соответствии с (3.1) для  $r$ -й по счету выборки  $u_{IF(r)}(t)$ .

Из-за технических особенностей, описанных, например, в [2], анализируемой полосе частот  $\Delta F$  соответствует лишь часть массива  $X_R(n)$ , имеющая объем  $N$  отсчетов ( $N < N_{IF}$ ). Значение  $N$  определяется объемом обрабатываемых выборок  $N_{IF}$  и особенностями обработки колебания  $u_{ex}(t)$  при формировании дискретизируемого процесса  $u_{IF}(t)$ . От объема выборки  $N_{IF} = N_{БПФ}$  зависит интервал по частоте между отсчетами (частотный бин)

$$\delta f = F_{д} / N_{БПФ} = \Delta F / N \quad (3.3)$$

и выраженная в отсчетах дискретного спектра ширина радиоканалов

$$B = \Delta F_{рк} / \delta f \quad (3.4)$$

где  $\Delta F_{pk}$  – физическая ширина радиоканалов в герцах.

Возможный вид энергетического спектра (3.2) показан на рис. 3.1, а информацию о его статистических характеристиках можно найти в работах [3, 4], хотя вполне очевидно, что все спектральные отсчеты можно разделить на *шумовые* и *сигнальные отсчеты*. Оптимальное правило разделения спектральных отсчетов на шумовое  $\theta_u$  и сигнальные  $\theta_m$  подмножества состоит в сравнении  $x_n$  с некоторым порогом  $x_{nop1}$

$$x_n \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} x_{nop1} \cdot \quad (3.5)$$

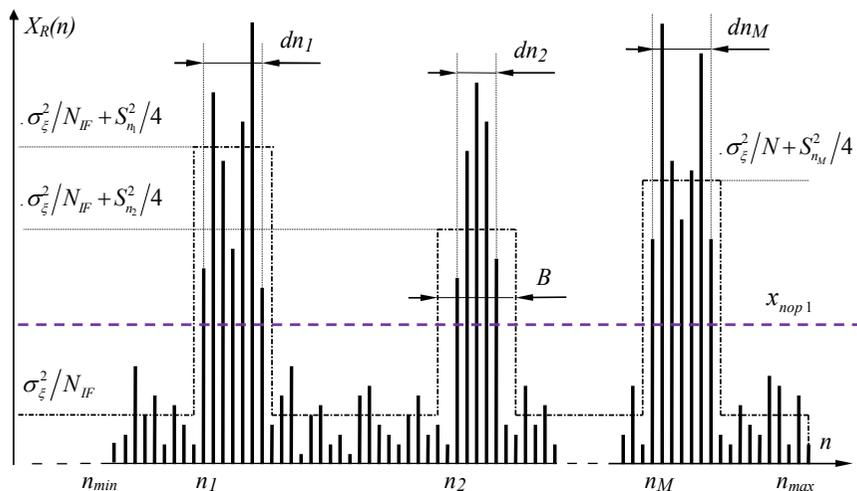


Рис. 3.1. Пример усредненного энергетического спектра анализируемого случайного процесса для полезных сигналов с равномерным по частоте спектром

Пороговый алгоритм будет порождать ложное обнаружение сигналов, если хотя бы один из шумовых спектральных отсчетов превысит уровень  $x_{nop1}$ . С возрастанием числа шумовых отсчетов вероятность ложного обнаружения увеличивается и для контроля вероятности ложного обнаружения в расчете на

один радиоканал  $P_{\text{ло1}}$  следует ориентироваться на радиоканалы с наибольшей выраженной в отсчетах спектра шириной  $B$

$$P_{\text{ло1}} = 1 - F_{\chi^2}^B(x_{\text{ноп1}}), \quad (3.6)$$

где  $F_{\chi^2}(x)$  - функция распределения шумовых отсчетов.

Тогда допустимая вероятность превышения порога отдельным шумовым отсчетом усредненного спектра будет определяться величиной

$$\varepsilon = 1 - F_{\chi^2}(x_{\text{ноп1}}) = 1 - (1 - P_{\text{ло1}})^{1/B} \approx P_{\text{ло1}}/B. \quad (3.7)$$

В соответствии с [5] для центрального  $\chi^2$ -распределения аргумент  $\chi_{\varepsilon}^2$ , для которого  $P\{\chi^2 \geq \chi_{\varepsilon}^2\} = \varepsilon$ , приближенно определяется соотношением

$$\chi_{\varepsilon}^2 \approx \frac{\lambda}{2} \cdot J \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{9J} + x_{\varepsilon} \sqrt{\frac{2}{9J}} \right\}^3, \quad (3.8)$$

где  $J$  - число степеней свободы распределения,  $x_{\varepsilon}$  - процентная точка гауссовского распределения, для расчета которой можно использовать приближенное соотношение [5, с. 729]

$$x_{\varepsilon} = t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3}, \quad (3.9)$$

где  $t = \sqrt{\ln(1/\varepsilon^2)}$ ,  $c_0 = 2.515517$ ,  $c_1 = 0.802853$ ,  $c_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  $d_3 = 0.001308$ .

Учитывая, что число степеней свободы распределения  $J = 2R$ , из (3.8) можно получить следующее правило расчета порога  $x_{\text{ноп1}}$ , разделяющего спектральные отсчеты на шумовое и сигнальные подмножества при одноканальной обработке

$$x_{\text{ноп1}}(\sigma_{\xi^1}^2, R) = \sigma_{\xi^1}^2 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{9R} + x_{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{9R}} \right\}^3, \quad (3.10)$$

где  $x_\varepsilon$  определяется аппроксимацией (3.9), вероятность  $\varepsilon$  – соотношением (3.7), а

$$\sigma_{\varepsilon 1}^2 = \sigma_\varepsilon^2 / N_{IF} \quad (3.11)$$

– мощность шума, приходящаяся на каждый отсчет используемого спектра.

Вероятность пропуска сигнала  $u_m(t)$ , состоящего из  $dn_m$  отсчетов, характеризуемых отношениями сигнал-шум по мощности  $h_{n_m+q}^2$  ( $q = \overline{0 \dots dn_m - 1}$ ), может быть рассчитана как

$$P_{nc1} = \prod_{q=0}^{dn_m-1} P_{nc} \left( h_{n_m+q}^2 \right). \quad (3.12)$$

где вероятности пропуска отдельных сигнальных отсчетов могут быть определены на основе сведений из таблиц 3.1-3.4.

### 3.2. Образцы решения задач

Подготовку к освоению текущего раздела следует начинать с изучения материалов, представленных в подразделах 3.1–3.3 монографии [2].

**Задача 1.** Определить порог обнаружения сигналов по энергетическому спектру  $X_R(n)$ , рассчитанному с помощью БПФ без взвешивания и усреднения, если необходимо обеспечить вероятность ложного обнаружения сигналов на отсчет не более  $\varepsilon = 0,05$ .

Сопоставить вероятности пропуска сигналов одинаковой мощности, один из которых представлен двумя отсчетами с  $h_{n_m+q}^2 = [4,0 \ 4,0]$ , а другой характеризуется отношениями сигнал-шум  $h_{n_m+q}^2 = [2,8 \ 5,2]$ .

Оценить, можно ли улучшить характеристики обнаружения, если формировать энергетический спектр со взвешиванием окном Кайзера-Бесселя и использованием двукратного усреднения?

Таблица 3.1

Вероятность  $P_{nc}(h_n^2)$  пропуска сигнальных отсчетов  
при БПФ без взвешивания и без усреднения  $R=1$

| Вероятность $\varepsilon$<br>ложного обн.<br>отсчета шума | Порог<br>при<br>$\sigma_{\xi 1}^2 = 1$ | Отношение сигнал-шум $SNR$ , дБ |      |      |            |
|---|--|---------------------------------|------|------|------------|
|   |  | 3                               | 6    | 9    | 12         |
| 0,05  | 2,97                                   | 0,53                            | 0,25 | 0,04 | $<10^{-3}$ |
| 0,02  | 3,90                                   | 0,69                            | 0,40 | 0,09 | 0,001      |
| 0,005   | 5,34                                   | 0,84                            | 0,60 | 0,19 | 0,006      |
| 0,002   | 6,32                                   | 0,90                            | 0,71 | 0,28 | 0,014      |
| 0,0005  | 7,83                                   | 0,95                            | 0,77 | 0,36 | 0,02       |

Таблица 3.2

Вероятность  $P_{nc}(h_n^2)$  пропуска сигнальных отсчетов  
при БПФ без взвешивания при  $R = 2$

| Вероятность $\varepsilon$<br>ложного обн.<br>отсчета шума | Порог<br>при<br>$\sigma_{\xi 1}^2 = 1$ | Отношение сигнал-шум $SNR$ , дБ |      |       |            |
|---|--|---------------------------------|------|-------|------------|
|   |  | 3                               | 6    | 9     | 12         |
| 0,05  | 2,36                                   | 0,34                            | 0,08 | 0,001 | $<10^{-3}$ |
| 0,02  | 2,92                                   | 0,52                            | 0,15 | 0,005 |            |
| 0,005   | 3,74                                   | 0,71                            | 0,29 | 0,02  |            |
| 0,002   | 4,27                                   | 0,80                            | 0,40 | 0,03  |            |
| 0,0005  | 5,09                                   | 0,89                            | 0,54 | 0,07  |            |

Таблица 3.3

Вероятность  $P_{nc}(h_n^2)$  пропуска сигнальных отсчетов  
при использовании окна Кайзера-Бесселя и  $R = 2$

| Вероятность $\varepsilon$<br>ложного обн.<br>отсчета шума | Порог<br>при<br>$\sigma_{\xi 1}^2 = 1$ | Отношение сигнал-шум $SNR$ , дБ |      |       |             |
|---|--|---------------------------------|------|-------|-------------|
|   |  | 3                               | 6    | 9     | 12          |
| 0,05  | 1,70                                   | 0,46                            | 0,15 | 0,005 | $< 10^{-3}$ |
| 0,02  | 1,95                                   | 0,60                            | 0,24 | 0,015 |             |
| 0,005   | 2,25                                   | 0,75                            | 0,38 | 0,04  |             |
| 0,002   | 2,50                                   | 0,84                            | 0,50 | 0,07  |             |
| 0,0005  | 2,85                                   | 0,92                            | 0,65 | 0,13  |             |

Таблица 3.4

Вероятность  $P_{nc}(h_n^2)$  пропуска сигнальных отсчетов  
при использовании окна Кайзера-Бесселя и  $R = 4$

| Вероятность $\varepsilon$<br>ложного обн.<br>отсчета шума | Порог<br>при<br>$\sigma_{\xi 1}^2 = 1$ | Отношение сигнал-шум $SNR$ , дБ |      |             |             |
|---|--|---------------------------------|------|-------------|-------------|
|   |  | 3                               | 6    | 9           | 12          |
| 0,05  | 1,47                                   | 0,25                            | 0,02 | $< 10^{-3}$ | $< 10^{-3}$ |
| 0,02  | 1,62                                   | 0,38                            | 0,04 |             |             |
| 0,005   | 1,86                                   | 0,58                            | 0,11 |             |             |
| 0,002   | 1,97                                   | 0,66                            | 0,16 | 0,001       |             |
| 0,0005  | 2,17                                   | 0,80                            | 0,28 | 0,003       |             |

## Решение

а) Подставим предельно допустимое значение  $\varepsilon = 0,05$  в (3.9) и получим значение вспомогательного параметра  $x_\varepsilon = 1,645$ . Подставив это значение и  $R = 1$  в формулу (3.10) для нормированного порога обнаружения, получим  $x_{nop1} = 2,97$ , т.е. вероятность ложного обнаружения отсчетов шума в расчете на отсчет  $\varepsilon = 0,05$  обеспечивается при примерно 3-кратном превышении порога  $x_{nop1}$  над усредненной мощностью шума  $\sigma_{\xi_1}^2$ . Отметим, что из первой строки табл. 3.1 значение  $x_{nop1} = 2,97$  можно было взять и готовым.

Для расчета вероятности пропуска сигналов, представленных двумя спектральными отсчетами, учтем, что согласно табл. 3.1 вероятность пропуска одиночных отсчетов с  $h^2 = 4,0 \approx \approx 6$  дБ составляет около  $P_{nc}(h_n^2) \approx 0,25$ , а значит (в соответствии с (3.12)) вероятность пропуска сигнала, представленного одинаковыми отсчетами составит  $P_{nc1} \approx 0,25^2 \approx 0,06$ . Если же мощности отсчетов отличаются, то используя для простоты расчета линейную интерполяцию вероятностей из табл. 3.1 рассчитаем  $P_{nc}(2,8 \approx 4,5 \text{ дБ}) \approx 0,5 \cdot (0,53 + 0,25) = 0,39$  и  $P_{nc}(5,2 \approx 7,2 \text{ дБ}) \approx \approx 0,15$  и, соответственно,  $P_{nc1} \approx 0,25^2 \approx 0,059$ . Таким образом, из двух сигналов одинаковой мощности сигнал с равномерной спектральной плотностью мощности оказывается более сложным с позиции обнаружения.

Для расчетов вероятностей пропуска сигналов на основе энергетического спектра, полученного с использованием окна Кайзера-Бесселя при  $R = 2$ , будем использовать значения из верхней строки табл. 3.3. Для равных по мощности отсчетов получаем  $P_{nc}(4,0 \approx 6 \text{ дБ}) \approx 0,15$ , откуда итоговая вероятность пропуска сигналов  $P_{nc1} \approx 0,15^2 = 0,0225$ . Для двух отсчетов разной интенсивности имеем  $P_{nc}(2,8 \approx 4,5 \text{ дБ}) \approx 0,3$  и  $P_{nc}(5,2) \approx 0,08$

откуда в итоге  $P_{nc1} \approx 0,3 \cdot 0,08 = 0,024$ . Таким образом, хотя применение взвешивания чуть увеличивает вероятности пропуска сигналов (см. сравнение табл. 3.2 и 3.3), но даже минимальное ( $R = 2$ ) усреднение гарантирует заметное улучшение качественных показателей обнаружителя.

**Задача 2.** Сопоставьте вероятности обнаружения

а) узкополосного сигнала с  $h^2 = 16$ , представленного одиночным отсчетом  $dn_1 = 1$ ;

б) сигнала из  $dn_2 = 4$  отсчетов, характеризуемых  $h_2^2 = 4$  и

в) сигнала из  $dn_3 = 8$  отсчетов, характеризуемых отношением сигнал-шум  $h_3^2 = 2$

при расчете спектра с помощью БПФ без взвешивания и усреднения при пороге, обеспечивающем  $\varepsilon \approx 0,05$ .

**Решение**

а) Вновь используя данные из первой строки табл. 3.1, получим, что в анализируемых условиях вероятность пропуска первого сигнала составит  $P_{nc1} < 10^{-3}$ ; аналогичный расчет для второго сигнала даёт  $P_{nc1} = 0,25^4 \approx 0,004$ , а вероятность пропуска последнего сигнала с широким спектром и низкой спектральной плотностью мощности составляет  $P_{nc1} \approx 0,53^8 = 0,006$ . Таким образом, обнаружение относительно широкополосных сигналов низкой интенсивности оказывается наиболее проблематичным.

**Задача 3.** Определите минимальное количество усреднений выборок сигнала при формировании энергетического спектра (3.2), необходимое для того, чтобы обнаружитель обеспечивал вероятность правильного обнаружения не ниже 99,5% для сигналов с шириной спектра  $dn_m \geq 4$  при отношениях сигнал-шум  $h_2^2 \geq 4$ , а также, чтобы корректная работа обнаружителя

сохранялась при наличии в диапазоне частот сигналов, отличающихся по уровню на 80 дБ. Какую приведенную (т.е. в расчете на радиоканал) вероятность  $P_{\text{лож1}}$  ложного обнаружения сможет обеспечивать обнаружитель?

### Решение

а) Обнаружитель, базирующийся на использовании спектра, рассчитываемого без взвешивания, даёт меньшую вероятность пропуска сигналов, однако для него характерны аномальные ошибки ложного обнаружения сигналов по боковым лепесткам спектров мощных радиоизлучений, поэтому в ситуации, когда в одном диапазоне со слабыми сигналами могут наблюдаться сигналы, превышающие их по уровню на 80 дБ, допустимо использовать лишь спектр (3.2), полученный на базе взвешивающего окна Кайзера-Бесселя (см. ранее табл. 3.2).

б) Заявленное в условии минимальное отношение сигнал-шум  $h^2 = 4,0$  в децибелах составит  $SNR = 10 \cdot \lg(h^2) \approx 6$  дБ. Соответственно, вероятности пропусков отдельных сигнальных спектральных отсчетов будут определяться столбцами табл. 3.3 и табл. 3.4 для  $SNR = 6$  дБ. При этом пока сохраняется свобода в отношении выбора как таблицы, так и номера строки в ней. Выбор какой-то из стартовых строк заметно облегчает выполнение требований к вероятности правильного обнаружения сигналов, однако ценой роста вероятности ложного обнаружения сигналов.

в) С учетом (3.12) при  $V = dn_m = 4$  отсчетам для обеспечения вероятности правильного обнаружения сигналов не ниже 90% необходима вероятность пропуска сигнальных отсчетов не более  $P_{\text{пс1}} = \sqrt[4]{0,005} \approx 0,27$ . В табл. 3.3 чуть меньшая вероятность обеспечивается при  $\varepsilon = 0,02$ , что для каналов шириной в 4 отсчета в соответствии с (3.7) означает: приведенная вероятность ложного обнаружения сигналов составит  $P_{\text{лож1}} = 1 - (1 - \varepsilon)^4 = 0,98^4 \approx 0,08$ . И хотя формально такой исход выглядит допус-

тимым следует учесть, что это означает весьма частое возникновение ложных обнаружений для диапазонов частот, состоящих из хотя бы 12 радиоканалов. К примеру, если диапазон будет включать  $M_{pk} = 25$  каналов, то вероятность того, что хотя бы в одном из них обнаружитель примет выбросы шума за сигнал, составит

$$P_{ло\ общ} = 1 - (1 - P_{ло1})^{M_{pk}} = 1 - 0,92^{25} \approx 0,87, \quad (3.13)$$

что вряд ли можно считать отличным результатом.

г) В табл. 3.4 вероятность «0,28» близкая к полученной в предыдущем пункте  $P_{nc1}$  обеспечивается при  $\varepsilon = 0,0005$ , что соответствует низкой (безопасной) вероятности ложного обнаружения. К примеру, для диапазона частот из 25 радиоканалов вероятность возникновения во всем диапазоне хотя бы одного ложного обнаружения составит лишь  $P_{ло\ общ} \approx 0,01$ .

д) Отсутствие детальных сведений для случая  $R = 3$  не позволяет детально указать, сколь эффективным окажется решение, предполагающее использование энергетического спектра, получаемого усреднением трёх выборок, однако очевидно, что оно будет обеспечивать промежуточное между пунктами «в» и «г» качество работы обнаружителя. Если полагать, что незначительное количество ложных обнаружений является допустимым (на практике это влечет потери времени на перепроверку ложно обнаруженных сигналов, но одновременно означает повышение чувствительности обнаружителя), то случай  $R = 3$  можно рассматривать как решение с минимальным количеством усреднений выборок сигнала.

### 3.3. Индивидуальные контрольные задания

**Задача 3.1.** Энергетический обнаружитель производит контроль радиообстановки на основе спектра (3.2), формируемого усреднением  $R = 2$  спектральных выборок, рассчитываемых с использованием окна Кайзера-Бесселя. Предполагая, что ширина

радиоканалов (в отсчетах) в анализируемом диапазоне частот определяется столбцом «В» табл. 3.5, а предельно допустимая вероятность ложного обнаружения в расчете на радиоканал задаётся соседним столбцом той же таблицы определите, при какой ширине спектра сигналов  $dn_m$  в канале можно будет обнаруживать радиосигналы  $h_m^2 \geq 4$  с вероятностью пропуска сигналов не более указанной в последнем столбце табл. 3.5.

Таблица 3.5

| Но-<br>мер | Ширина ра-<br>диоканалов В<br>(отсчетов) | Допустимая веро-<br>ятность ложного<br>обнаружения, $P_{ло1}$ | Вероятность про-<br>пуска сигналов<br>$P_{пс1}$ , не более |
|------------|--|---|--|
| 1          | 5  | 0,01  | 0,15   |
| 2          | 4  | 0,02  | 0,02   |
| 3          | 3  | 0,015   | 0,15   |
| 4          | 6  | 0,03  | 0,01   |
| 5          | 5  | 0,1   | 0,005  |
| 6          | 4  | 0,1   | 0,015  |
| 7          | 3  | 0,06  | 0,015  |
| 8          | 6  | 0,0125  | 0,05   |
| 9          | 5  | 0,01  | 0,25   |
| 10         | 4  | 0,02  | 0,15   |

**Задача 3.2.** Количество выборок, усредняемых при формировании усредненного спектра (3.2), указано в левой колонке табл. 3.6. Мощность шума  $\sigma_{\xi_1}^2$ , приходящаяся в среднем на каждый отсчет используемого спектра, представлена в центральной колонке той же таблицы. Рассчитайте порог обнаружения, обеспечивающий вероятность  $\varepsilon$  ложного обнаружения сигналов в расчете на отсчет, не превышающую значение, указанное в правой колонке табл. 3.6.

Таблица 3.6

| Но-<br>мер | Количество<br>усреднений<br>R | Удельная<br>мощность<br>шума $\sigma_{\xi 1}^2, B^2$ | Вероятность $\varepsilon$<br>ложного обнаружения<br>сигналов на отсчет |
|------------|-------------------------------|--|--|
| 1          | 8                             | 0,1  | 0,0025   |
| 2          | 6                             | 0,2  | 0,0015   |
| 3          | 10                            | 0,3  | 0,0005   |
| 4          | 8                             | 0,4  | 0,0002   |
| 5          | 6                             | 0,5  | 0,01   |
| 6          | 4                             | 1  | 0,005  |
| 7          | 2                             | 2  | 0,0025   |
| 8          | 10                            | 3  | 0,002  |
| 9          | 8                             | 4  | 0,001  |
| 10         | 6                             | 5  | 0,0005   |

**Задача 3.3.** Усредненный энергетический спектр сформирован путем усреднения двух спектральных выборок, полученных при помощи БПФ без взвешивания. Спектр сигнала состоит из трёх отсчетов ( $dn_m=3$ ), отношение сигнал-шум для которых представлено в левой колонке табл. 3.7. Порог обнаружения выбран соответствующим вероятности ложного обнаружения сигналов на отсчет  $\varepsilon$ , представленной в правой колонке табл. 3.7. Определите вероятность пропуска подобного сигнала обнаружителем.

Таблица 3.7

| Но-<br>мер | Отношения<br>сигнал-шум, $h_{n_m+q}^2$ | Вероятность $\varepsilon$ ложного обнару-<br>жения сигналов на отсчет |
|------------|--|---|
| 1          | [ 8 16 8 ]                             | 0,0005  |
| 2          | [ 4 8 4 ]                              | 0,002   |
| 3          | [ 2 4 2 ]                              | 0,005   |
| 4          | [ 2 8 2 ]                              | 0,05  |

Окончание табл. 3.7

|    |            |        |
|----|------------|--------|
| 5  | [ 4 8 4 ]  | 0,02   |
| 6  | [ 4 16 4 ] | 0,0005 |
| 7  | [ 2 8 2 ]  | 0,002  |
| 8  | [ 4 8 4 ]  | 0,005  |
| 9  | [ 2 16 2 ] | 0,05   |
| 10 | [ 2 8 2 ]  | 0,02   |

**Задача 3.4.** Количество выборок, усредняемых при формировании усредненного спектра (3.2), указано в левой колонке табл. 3.8, а нормированный к  $\sigma_{\xi_1}^2$  порог, используемый обнаружителем – в центральной колонке той же таблицы. Рассчитайте вероятность пропуска сигнала, состоящего из трёх отсчетов с одинаковым отношением сигнал-шум  $h_{n_m}^2 = 8$ , если способ взвешивания выборок при расчете спектра указан в правой колонке табл. 3.8.

Таблица 3.8

| Но-<br>мер | Количество<br>усреднений<br>R | Нормирован-<br>ный порог<br>обнаружения | Окно, используемое<br>для взвешивания<br>выборок |
|------------|-------------------------------|---|--|
| 1          | 4                             | 2,75                                    | Кайзера-Бесселя                                  |
| 2          | 2                             | 3,74                                    | Кайзера-Бесселя                                  |
| 3          | 2                             | 2,91                                    | отсутствует                                      |
| 4          | 4                             | 3,06                                    | Кайзера-Бесселя                                  |
| 5          | 2                             | 4,27                                    | Кайзера-Бесселя                                  |
| 6          | 2                             | 4,27                                    | отсутствует                                      |
| 7          | 4                             | 3,52                                    | Кайзера-Бесселя                                  |
| 8          | 2                             | 2,91                                    | Кайзера-Бесселя                                  |
| 9          | 2                             | 3,74                                    | отсутствует                                      |
| 10         | 4                             | 2,27                                    | Кайзера-Бесселя                                  |

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ШУМОВОГО УЧАСТКА НА ОСИ ЧАСТОТ

### 4.1. Теоретические основы

4.1.1. Ширина максимального шумового промежутка при известном числе сигналов в диапазоне частот

Рассмотрим представленный на рис. 4.1 пример радиобстановки. Если в диапазоне частот действуют  $M$  радиосигналов, то количество шумовых промежутков между спектрами подобных сигналов может варьироваться от 2 (при смежном по частоте расположении всех сигналов) до  $(M + 1)$ , однако их ширина  $Q_m$  и расположение на оси частот до осуществления обнаружения сигналов – неизвестны. Статистические характеристики ширины  $Q_{\max}$  максимального по ширине промежутка между спектрами сигналов для случая равновероятного расположения

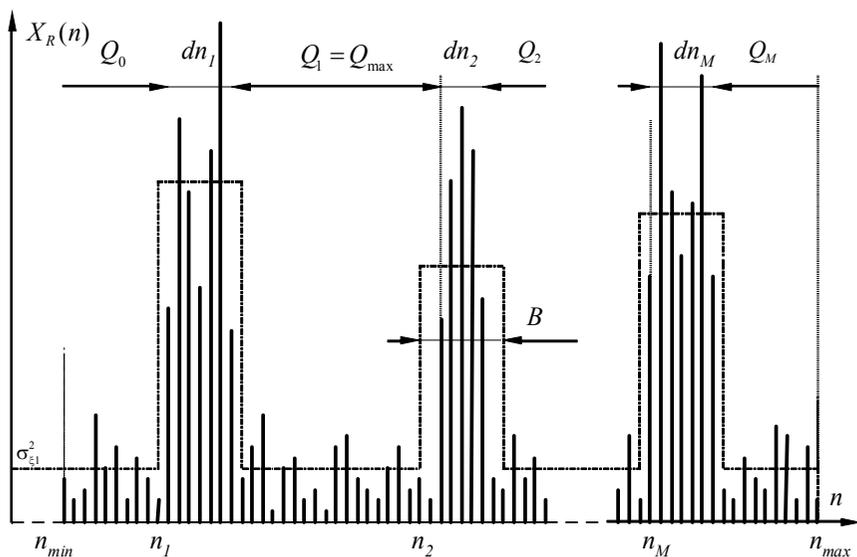


Рис. 4.1. Возможный вид расположения спектров сигналов в диапазоне частот

сигналов в любой части диапазона исследованы, например, в [3, 6], но если расположение спектров на оси частот подчиняется сетке радиоканалов, то ширина частотных интервалов между спектрами сигналов будет определяться уже общим количеством радиоканалов  $L$  и загруженностью  $\nu$  анализируемой полосы частот. Загруженность полосы частот определяется долей в ней сигнальных отсчетов и равна

$$\nu = N_c / N = \sum_{m=1}^M dn_m / N. \quad (4.1)$$

Чем меньше общий размер  $N$  спектрального массива и чем выше загруженность  $\nu$ , тем при прочих равных условиях меньше вероятность обнаружить достаточно протяженный свободный от сигналов участок, однако конечный результат существенно зависит ещё и от особенностей расположения на оси частот сигнальных отсчетов. Если сигнальные отсчеты группируются вместе (например, при использовании высокого разрешения по частоте и, соответственно, при большой ширине радиоканала  $B \gg 1$ ), то ширина свободных от сигналов промежутков на оси частот в среднем увеличивается. Если же ширина радиоканала мала  $B \approx 1$ , а сигналы располагаются в полосе частот приблизительно эквидистантно, то наличие протяженного шумового участка становится маловероятным. Загруженность диапазона  $\nu$ , при которой с вероятностью не менее 99 % в нём будут наблюдаться  $L_{qw}$  смежных свободных радиоканалов, представлена в табл. 4.1.

Рассмотрим случай, когда анализируемый диапазон частот представлен массивом  $X_R(n)$  объемом  $N = 600$  отсчетов, а ширина радиоканала составляет  $B = 6$  отсчетов. Тогда область анализа включает  $L = 100$  каналов и согласно табл. 4.1 (см. колонку «100») на наличие свободного от сигналов промежутка шириной, к примеру, 24 отсчета (т.е. 4 радиоканала) можно рассчитывать при загруженности, не превышающей  $\nu = 47\%$ .

Таблица 4.1

Предельно допустимая загруженность  $\nu$  диапазона частот, при которой в нем с вероятностью 99 % наблюдается не менее  $L_{qv}$  смежных свободных радиоканалов

| Число свободных каналов $L_{qv}$ | Предельно допустимая загруженность $\nu$ (%) при общем числе каналов $L$ |     |     |     |    |    |    |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|----|----|----|
|                                  | 600  | 300 | 150 | 100 | 80 | 62 | 50 |
| 16                               | 17   | 13  | 9   | -   | -  | -  | -  |
| 12                               | 25   | 20  | 14  | 10  | 8  | -  | -  |
| 8                                | 38   | 32  | 25  | 21  | 18 | 14 | -  |
| 7                                | 44   | 37  | 30  | 25  | 22 | 19 | 12 |
| 6                                | 50   | 43  | 36  | 30  | 28 | 24 | 20 |
| 5                                | 58   | 50  | 43  | 38  | 35 | 31 | 28 |
| 4                                | 67   | 60  | 53  | 47  | 45 | 42 | 36 |
| 3                                | 78   | 72  | 65  | 60  | 58 | 53 | 50 |
| 2                                | 89   | 87  | 82  | 77  | 76 | 73 | 69 |

Если же ширина радиоканала составит лишь  $B = 2$  отсчета, то число радиоканалов в диапазоне будет равно  $L = 300$ , а на тот же свободный промежуток шириной 24 отсчета (т.е. 12 радиоканалов) можно рассчитывать лишь при загруженности  $\nu \leq 20\%$ .

При выборе ширины участка радиодиапазона, на котором предполагается производить оценку интенсивности шума, следует принимать во внимание, что в условиях сложной радиостановки целесообразно ориентироваться на поиск относительно небольшого по протяженности свободного от сигналов участка, который обязан практически наверняка присутствовать в диапазоне частот и, вместе с тем, ширина которого достаточна для получения оценки шума с не слишком высокой дисперсией. Для массива спектра  $X_R(n)$  объемом от нескольких сотен до нескольких тысяч отсчетов ширина подобного участка может составлять до нескольких десятков отсчетов.

Информация о минимальном размере массива спектральных отсчетов  $X_R(n)$ , позволяющем при известной загрузке гарантировать наличие в полосе частот хотя бы одного промежутка между спектрами сигналов шириной  $QW$  отсчетов, представлена на рис. 4.2. При формировании рис. 4.2 учтено, что для повышения скорости просмотра диапазона частот при панорамном обнаружении ширину радиоканала  $B$  обычно стараются минимизировать и приоритетными для исследований являются значения ширины радиоканала из диапазона  $B = 4 \dots 8$  отсчетов [4]. Отметим, что согласно рис. 4.2 даже при анализе данных объемом  $N \leq 10^3$  отсчетов и при заметной занятости диапазона частот можно рассчитывать на существование между спектрами сигналов хотя бы одного шумового промежутка размером  $QW < 20$  отсчетов.

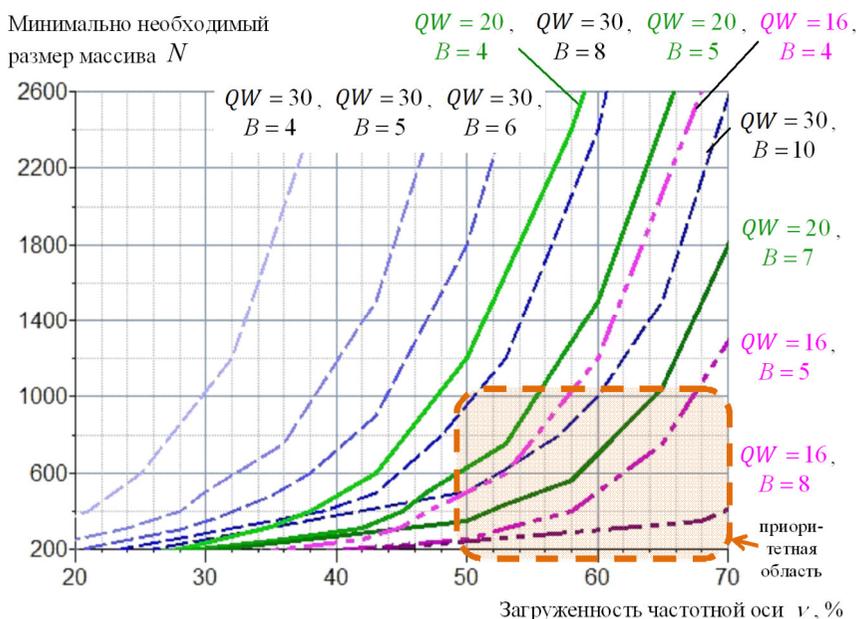


Рис. 4.2. Размер массива спектральных данных, минимально необходимый для существования в диапазоне частот

4.1.2. Поиск расположения шумового участка по минимальному значению сглаженного спектра

Для оценки расположения в радиодиапазоне свободного от сигналов частотного интервала будем ориентироваться на минимальное значение спектра, сглаженного прямоугольным окном. Для пояснения данного утверждения рассмотрим сглаженный по частоте энергетический спектр

$$\tilde{X}_R(n) = \frac{1}{WW} \cdot \sum_{i=n-\text{int}[(WW-1)/2]}^{n+\text{int}[WW/2]} X_R(i), \quad (4.2)$$

где  $WW$  – ширина окна сглаживания, выбираемая по правилу

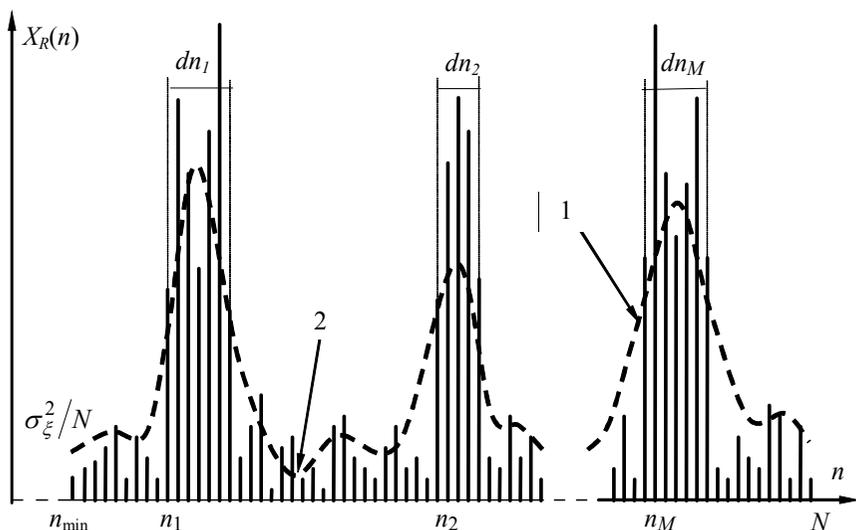
$$WW \leq QW(N, B, v), \quad (4.3)$$

$QW(\cdot)$  – прогнозируемая ширина максимального промежутка между спектрами обнаруживаемых сигналов. Возможный вид сглаженного спектра представлен на рис. 4.3. Каждый отсчет  $\tilde{X}_R(n)$  этого спектра представляет собой оценку математического ожидания отсчетов спектра  $X_R(n)$  на интервале шириной  $WW$  с центром в  $n$ -м отсчете, а на сигнальных участках превышает математическое ожидание на участках шумовых. Это значит, что при наличии в анализируемом спектре хотя бы одного свободного от сигналов участка шириной не менее  $WW$  отсчетов, начало этого (или какого-либо аналогичного из шумовых) участков может быть найдено на основе правила

$$n_u = \left( \arg \min_n \tilde{X}_R(n) \right) - \text{int} \left[ \frac{WW-1}{2} \right]. \quad (4.4)$$

Следует, однако, иметь в виду, что участок оси частот, начало которого определяется правилом (4.4), выбирается из, возможно, многих шумовых промежутков за счет поиска минимального значения. Соответственно, среднее арифметическое отсчетов на участке, стартующем с  $n_u$ , будет равно

$$\tilde{x}_{\min} = \min_n \tilde{X}_R(n). \quad (4.5)$$



1 – приближенный результат сглаживания дискретного спектра,  
 2 – центр участка, который будет выбран в качестве шумового

Рис. 4.3. Результат сглаживания дискретного спектра мощности наблюдаемого случайного процесса

## 4.2. Образцы решения задач

**Задача 1.** В энергетическом спектре (3.2), используемом для контроля радиообстановки в диапазоне частот, отдельные радиоканалы представлены 5 спектральными отсчетами. Дайте рекомендации по поиску участка оси частот, на котором можно осуществлять оценивание интенсивности шума, при разных соотношениях между шириной этого диапазона и его загруженностью  $\nu$ .

### Решение

а) Независимо от параметров радиообстановки для поиска шумового участка можно рекомендовать соотношение (4.4), однако требует внимания выбор ширины окна сглаживания  $WW$ .

б) Рассмотрим фрагмент приведенной выше табл. 4.1:

| Число свободных каналов $L_{qw}$ | Предельно допустимая загруженность $\nu$ (%) при общем числе каналов $L$ |     |     |     |    |    |    |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|----|----|----|
|                                  | 600  | 300 | 150 | 100 | 80 | 62 | 50 |
| 16                               | 17   | 13  | 9   | -   | -  | -  | -  |
| 12                               | 25   | 20  | 14  | 10  | 8  | -  | -  |
| 8                                | 38   | 32  | 25  | 21  | 18 | 14 | -  |
| 7                                | 44   | 37  | 30  | 25  | 22 | 19 | 12 |
| 6                                | 50   | 43  | 36  | 30  | 28 | 24 | 20 |
|                                  |  |     |     |     |    |    |    |

Рис. 4.4 Фрагмент таблицы, содержащей значения предельно допустимой загруженности  $\nu$  диапазона частот

Выделенные цветом ячейки соответствуют случаям, когда загруженность диапазона не превышала 20%. Умножив количество  $L_{qw}$  каналов в ожидаемом шумовом интервале и общую ширину диапазона в  $L$  каналов на  $B = 5$ , получим зависимость, представленную на рис. 4.4 линией красного цвета; эта линия характеризует рекомендации для случая  $\nu = 20\%$ .

Результаты аналогичной операция по ячейкам табл. 4.1 с загруженностью 30% отображены на рис. 4.4 линией черного цвета, а зависимость между шириной окна сглаживания спектральных отсчетов  $WW$  и соответствующей ему минимально необходимой шириной  $N$  анализируемого диапазона частот для случая  $\nu = 50\%$  показаны на рис. 4.4 линией синего цвета.

Полученные зависимости наглядно показывают, что в значительно загруженных диапазонах на наличие широких промежутков между спектрами можно рассчитывать лишь для очень широких, представленных тысячами спектральных отсчетов частотных диапазонов.

Отметим, что ту же самую задачу можно было бы решать и взяв за основу рис. 4.2. К примеру, линия « $QW = 30, B = 5$ »

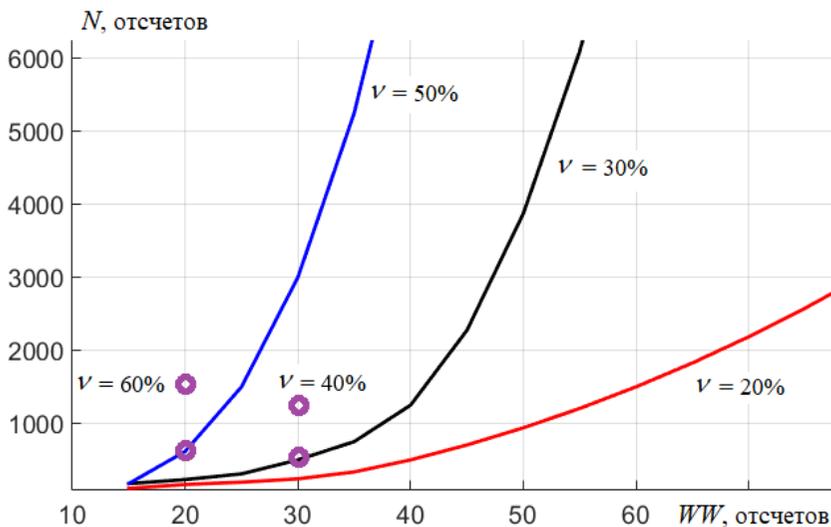


Рис. 4.5 Минимальная ширина спектра  $N$ , необходимая для безопасного использования окна сглаживания шириной  $WW$

на рис. 4.2 позволяет сформировать рекомендации: « $v = 30\% \rightarrow N = 500$ ;  $v = 40\% \rightarrow N = 1200$ », а линия « $QW = 20, B = 5$ » указывает на рекомендуемые соотношения: « $v = 50\% \rightarrow N = 600$ ;  $v = 60\% \rightarrow N = 1500$ ». Соответствующие метки фиолетового цвета, отображенные на рис. 4.5, показывают согласованность разных подходов к решению текущей задачи. Отличие состоит в том, что решение с опорой на табл. 4.1 позволяет получать соотношения для окон и диапазонов большой ширины, а на рис. 4.2 представлены рекомендации, полезные для грамотного выбора параметров обработки для диапазонов частот, представленных сотнями спектральных отсчетов при окнах сглаживания шириной не более  $QW = 30$  отсчетов.

**Задача 2.** Контроль радиообстановки в полосе частот шириной  $\Delta f = 10$  МГц базируется на обработке выборок отсчетов, дискретизируемых с частотой 25 МГц. Выборки объемом 4096 отсчетов подвергаются быстрому преобразованию Фурье (БПФ), и за счет накопления нескольких подобных спектров

формируется усредненный энергетический спектр (3.2). В этом спектре производится поиск участка, наиболее вероятно занятого лишь шумом, за счет использования оценки (4.4) с шириной окна сглаживания  $WW = 16$  отсчетов. Отдельные радиоканалы, образующие анализируемую полосу частот, имеют ширину 25 кГц. Определить, при какой максимально возможной загруженности может стать значимой вероятность отсутствия в полосе частот промежутка  $QW$  между спектрами радиостанций, превышающего по ширине  $WW$ ?

### Решение

а) При заданной в условии частоте дискретизации  $F_D = 25$  МГц и размерности БПФ  $N_{\text{БПФ}} = 4096$  отсчетов получаемый дискретный спектр согласно (3.3) будет характеризоваться интервалом между соседними спектральными отсчетами (бином)

$$\delta f = \frac{F_D}{N_{\text{БПФ}}} = \frac{25000}{4096} \approx 6,1 \text{ кГц}.$$

Соответственно, ширина радиоканалов в отсчетах составит

$$B = \frac{Ш_{\text{РК}}}{\delta f} = \frac{25}{6,1} \approx 4 \text{ отсчета}.$$

б) Размерность БПФ  $N_{\text{БПФ}} = 4096$  отсчетов соответствует частотному интервалу, определяемому частотой дискретизации  $F_D$ , а занятая сигналами полоса частот заметно уже и оказывается представленной лишь

$$N = N_{\text{БПФ}} \frac{Ш_{\text{полосы}}}{F_D} = 4096 \cdot \frac{10}{25} \approx 1638 \text{ отсчетами}.$$

в) Если для оценки взаимосвязи между размером спектрального массива  $N$  и загруженностью  $\nu$  диапазона частот использовать рис. 4.2, то анализируемый случай будет соответствовать самой левой из сиреневых линий с пометкой « $QW = 16, B = 4$ ». Проследивая пересечение этой линии с уровнем  $N = 1638$  нетрудно заметить, что абсциссой этого пересечения служит загруженность  $\nu \approx 62\%$ . Таким образом, при загруженности полосы частот, не превышающей 60%, вероятность отсут-

ствия в полосе частот промежутка  $QW > WW$  можно считать пренебрежимо малой, а вот при большей загруженности риск возникновения аномальных ошибок выявления шумовых участков спектра начнет нарастать.

### 4.3. Индивидуальные контрольные задания

**Задача 4.1.** При обеспечиваемом спектроанализатором частотном разрешении ширина радиоканалов в анализируемой полосе частот составляет  $B$  отсчетов и указана в левой колонке табл. 4.3, а объем массива, представляющего всю полосу частот указан в правой колонке этой таблицы. Поиск шумового участка для определения интенсивности шума производится по минимуму сглаженного энергетического спектра, формируемого на основе (4.2) с помощью окна шириной  $WW = 18$  отсчетов. При какой загруженности  $V$  в полосе частот с вероятностью не менее 99% должен обнаружиться хотя бы один промежуток между спектрами сигналов, превышающий по ширине  $WW$ ?

Таблица 4.3

| Но-<br>мер | Ширина радиоканала<br>$B$ , отсчетов | Ширина анализируемой<br>полосы частот $N$ , отсчетов |
|------------|--------------------------------------|--|
| 1          | 6                                    | 1400   |
| 2          | 4                                    | 1024   |
| 3          | 2                                    | 720  |
| 4          | 3                                    | 2048   |
| 5          | 7                                    | 1024   |
| 6          | 5                                    | 512  |
| 7          | 6                                    | 400  |
| 8          | 9                                    | 512  |
| 9          | 6                                    | 1480   |
| 10         | 4                                    | 256  |

**Задача 4.2.** Для анализа радиообстановки, параметры которой заданы в табл. 4.4, используется энергетический спектр (3.2) с интервалом между отсчетами  $\delta f$ , указанным в левой колонке той же таблицы. Если для поиска шумового промежутка в полосе частот предполагается использовать оценку (4.4), полученную с помощью окна сглаживания шириной  $QW = 30$  отсчетов, то при какой минимальной ширине полосы частот наличие промежутка, превышающего по ширине  $QW$ , можно считать практически гарантированным?

Таблица 4.4

| Но-<br>мер | Интервал между отс-<br>четами спектра (бин)<br>$\delta f$ , кГц | Ширина радио-<br>канала $\Pi_{рк}$ , кГц | Загружен-<br>ность $\nu$ , % |
|------------|---|--|------------------------------|
| 1          | 2,5   | 25                                       | 60                           |
| 2          | 1,5   | 12,5                                     | 52                           |
| 3          | 2   | 12,5                                     | 44                           |
| 4          | 5   | 25                                       | 40                           |
| 5          | 3,2   | 12,5                                     | 36                           |
| 6          | 20  | 200                                      | 70                           |
| 7          | 25  | 200                                      | 60                           |
| 8          | 20  | 120                                      | 50                           |
| 9          | 1,25  | 6,25                                     | 44                           |
| 10         | 1,6   | 6,25                                     | 32                           |

**Задача 4.3.** Объем  $N$  массива  $X_R(n)$  отражающего радио-обстановку в диапазоне частот задан в левой колонке табл. 4.5; ширина радиоканала  $B$  – в центральной колонке той же таблицы. Для поиска шумового участка на оси частот используется окно шириной  $WW$ , указанной в правой колонке табл. 4.5. С помощью табл. 4.1 определите, при какой загруженности диапазона  $\nu$  можно рассчитывать на то, что в диапазоне частот с вероятностью не менее 99% будет наблюдаться хотя бы один шумовой интервал, превышающий по ширине  $WW$ .

Таблица 4.5

| Но-<br>мер | Размер спек-<br>трального<br>массива $N$ | Ширина ра-<br>диоканала $B$ ,<br>отсчетов | Ширина окна поиска<br>шумового интервала<br>$WW$ , отсчетов |
|------------|--|---|---|
| 1          | 600                                      | 2   | 16  |
| 2          | 1800                                     | 3   | 24  |
| 3          | 256                                      | 4   | 20  |
| 4          | 512                                      | 5   | 30  |
| 5          | 1800                                     | 6   | 30  |
| 6          | 1200                                     | 2   | 24  |
| 7          | 1024                                     | 3   | 24  |
| 8          | 1200                                     | 4   | 20  |
| 9          | 750                                      | 5   | 20  |
| 10         | 3600                                     | 6   | 18  |

**Задача 4.4.** В математической среде Mathcad, MATLAB или какой-либо среде программирования сформируйте моделирующую программу для исследования степени смещения статистики  $\tilde{x}_{\min}$ , определяемой (4.5), при условии, что ширина  $WW$  окна сглаживания определяется в левой колонке табл. 4.6, а параметры радиообстановки определены в последующих колонках той же таблицы.

Таблица 4.6

| Но-<br>мер | Окно сгла-<br>живания $WW$ ,<br>отсчетов | Размер спек-<br>трального<br>массива $N$ | Ширина ра-<br>диоканала $B$ ,<br>отсчетов | Загру-<br>жен-<br>ность $V$ |
|------------|--|--|---|-----------------------------|
| 1          | 12                                       | 1024                                     | 8   | 10%                         |
| 2          | 12                                       | 4096                                     | 3   | 50%                         |
| 3          | 16                                       | 1024                                     | 4   | 30%                         |
| 4          | 16                                       | 4096                                     | 4   | 40%                         |

| Но<br>ме<br>р | Окно сгла-<br>живания $WW$ ,<br>отсчетов | Размер спек-<br>трального<br>массива $N$ | Ширина ра-<br>диоканала $B$ ,<br>отсчетов | Загру-<br>жен-<br>ность $V$ |
|---------------|--|--|---|-----------------------------|
| 5             | 16                                       | 512                                      | 4   | 10%                         |
| 6             | 18                                       | 1024                                     | 5   | 20%                         |
| 7             | 18                                       | 2048                                     | 5   | 30%                         |
| 8             | 18                                       | 8192                                     | 8   | 50%                         |
| 9             | 20                                       | 2048                                     | 8   | 40%                         |
| 10            | 20                                       | 4096                                     | 7   | 30%                         |

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обработка сигналов в системах радиомониторинга: методические указания к проведению практических занятий №1-2 для бакалавров направления 11.03.01 «Радиотехника» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. Б. Токарев. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 25 с.

2. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; под ред. А.М. Рембовского. – 3-е изд. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 640 с

3. Токарев, А.Б. Развитие методов и алгоритмов обработки сигналов при радиотехнических измерениях и радиоконтроле в условиях априорной неопределенности: диссертация ... доктора техн. наук: 05.12.04. – Воронеж, 2013. – 443 с.

4. Измерение занятости радиочастотного спектра в системах радиомониторинга: монография / А.Б. Токарев, Ю.С. Балашов, С.Ю. Белецкая, С.Н. Панычев, П.П. Чураков; под ред. А.Б. Токарева. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 227 с.

5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 830 с.

6. Токарев, А.Б. Рекомендации по выбору параметров обработки при поиске шумовых участков диапазона частот / А.Б. Токарев // Радиотехника. – 2012. – №2. – С. 49-52.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1. АНАЛИЗ РАДИООБСТАНОВКИ В ШИРОКИХ ПОЛОСАХ ЧАСТОТ И МЕТОДЫ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ.....</b>                    | <b>4</b>  |
| <b>2. ОСОБЕННОСТИ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА .....</b>                       | <b>4</b>  |
| <b>3. РАЗДЕЛЕНИЕ ОТСЧЕТОВ СПЕКТРА НА СИГНАЛЬНЫЕ И ШУМОВЫЕ ПРИ ИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ФОНОВОГО ШУМА.....</b> | <b>5</b>  |
| 3.1 Теоретические основы .....   | 5         |
| 3.2 Образцы решения задач .....  | 9         |
| 3.3 Индивидуальные контрольные задания .....   | 15        |
| <b>4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ШУМОВОГО УЧАСТКА НА ОСИ ЧАСТОТ .....</b>                                      | <b>19</b> |
| 4.1 Теоретические основы .....   | 19        |
| 4.1.1 Ширина максимального шумового промежутка при известном числе сигналов в диапазоне частот .....         | 19        |
| 4.1.2 Поиск расположения шумового участка по минимальному значению сглаженного спектра .....                 | 23        |
| 4.2 Образцы решения задач .....  | 24        |
| 4.3 Индивидуальные контрольные задания .....   | 28        |
| <b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>   | <b>31</b> |

**ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ  
В СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к проведению практических занятий №3-4 для бакалавров  
направления 11.03.01 «Радиотехника»  
очной формы обучения

**Составитель:**  
**Токарев Антон Борисович**

В авторской редакции

Компьютерный набор А. Б. Токарева

Подписано к изданию 01. 12. 2021.  
Уч.-изд. л. 2,1.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14