

## ЗАНЯТОСТЬ СПЕКТРА

### Вводные замечания

Из текстов новой Рекомендации МСЭ-М SM.1880 и раздела 4.10 новой версии Справочника МСЭ по радиоконтролю издания 2010 г. следует, что такой важный для практических применений фактор, как достоверность измерений занятости спектра, зависит от целого ряда параметров, характеризующих процесс измерений. К ним относятся: степень занятости спектра, периодичность<sup>1</sup> и общее число точек контроля<sup>2</sup>, заданный доверительный интервал<sup>3</sup> и т.д. Однако расчетные зависимости, которые могли бы быть заложены в программное обеспечение для управления сбором данных и для обработки результатов измерений занятости спектра, в текстах этих документов не приведены; приводимые сведения ограничиваются лишь небольшой таблицей с конкретными цифрами, не сопровождаемой формулами и не обеспечивающей полноты информации по данному вопросу.

В соответствии с рабочим документом «WORKING DOCUMENT TOWARDS A PRELIMINARY DRAFT NEW REPORT» (см. файл "E:\R07-WP1C-110525-TD-0061!!MSW-E.DOCX"), который далее будем называть «ПРОЕКТ ОТЧЕТА», в настоящее время корреспондентской группой ведется разработка нового Отчета по тематике измерений занятости радиочастотного спектра. Данным вкладом предлагается включить в разрабатываемый Отчет ряд подразделов и приложений (см. Приложения 1-5 к настоящему вкладу), в которых анализируется зависимость достоверности оценки занятости спектра от особенностей процедуры измерений. В последующем, при очередном пересмотре Рекомендации МСЭ-Р SM.1880, часть предлагаемых материалов может быть перенесена в новую версию этой Рекомендации и/или в очередную новую версию Справочника МСЭ по радиоконтролю.

Для контактов: Др. В.А. Козьмин, kv@ircoc.vrn.ru

---

<sup>1</sup> Revisit time

<sup>2</sup> Samples

<sup>3</sup> Confidence interval

## Общие рекомендации

**1** Текст ПРОЕКТА ОТЧЕТА предполагает размещение в разделе «Definitions» определений занятости радиоканала<sup>4</sup> и занятости полосы частот<sup>5</sup>, однако в упомянутом разделе будут содержаться лишь краткие текстовые формулировки этих понятий. Целесообразно также предоставить пользователям Отчета подробное и наглядное описание понятия «занятость», а также познакомить их с причинами возникновения погрешности при оценивании занятости. В связи с этим целесообразно до раздела «Measuring procedure» (или в самом начале этого раздела) разместить подраздел «Понятие занятости спектра и управление точностью и достоверностью её оценивания<sup>6</sup>». Предлагаемый текст данного подраздела приведен ниже в приложении 1.

**2** Текст ПРОЕКТА ОТЧЕТА предполагает включение в Отчет разделов с названиями «Measuring procedure» и «Calculation of occupancy», однако использование двух независимых разделов не способствует, а скорее затрудняет изложение соответствующих материалов, т.к. расчет занятости является естественным завершением измерительной процедуры, а разные процедуры измерений предполагают использование отличающихся расчетных формул. Как следствие, особенности процедур измерений, расчетные формулы<sup>7</sup>, а также вопросы обеспечения достоверности полученных результатов целесообразно рассматривать как единое целое в рамках раздела «Measuring procedure». В таком случае отдельный раздел «Calculation of occupancy» из Отчета можно будет исключить. Текст, предлагаемый к включению в раздел «Measuring procedure», приведен ниже в приложении 2.

**3** Исследования статистических свойств оценок занятости радиоканала показали, что на достоверность оценки влияет не только её величина, но и ряд иных показателей канала и процедуры оценивания. Подобная информация не является безусловно необходимой для осуществления измерений, однако будет полезна для тех пользователей Отчета, которым необходимо уяснить влияние параметров оценивания на достоверность получаемых оценок. Примеры, иллюстрирующие влияние на надежность измерений интенсивности потока сигналов в радиоканале, предлагается оформить как приложение А к Отчету по измерению занятости. Предлагаемый текст приложения А приведен в приложении 3 к настоящему вкладу. Расчетные соотношения, определяющие изменение достоверности оценок занятости, предлагается оформить как приложение В к Отчету по измерению занятости; текст данного приложения приведен в приложении 4 к настоящему вкладу.

**4** Материал приложений 1 – 4 опирается на ряд параметров, которые ранее не были в центре внимания при измерении занятости, однако оказывают влияние на достоверность получаемых оценок. Эти параметры целесообразно отразить в разделе «Definitions» Отчета. Рекомендуемые тексты соответствующих определений приводятся в приложении 5 к настоящему вкладу.

<sup>4</sup> Frequency channel occupancy (FCO)

<sup>5</sup> Frequency band occupancy (FBO)

<sup>6</sup> Occupancy and control on the accuracy and statistical confidence of its measurement (ориентировочный вариант)

<sup>7</sup> В рекомендациях и Справочнике МСЭ по радиоконтролю применительно к измерению занятости устоявшихся обозначений для величин найти не удалось. Вместе с тем, фиксация расчетных соотношений лишь в текстовой форме (без использования символьных обозначений) вряд ли возможна, поэтому какой-то набор обозначений предложить было необходимо. Авторами вклада была использована своя система обозначений, которая, естественно, в дальнейшем подлежит согласованию с предложениями других разработчиков.

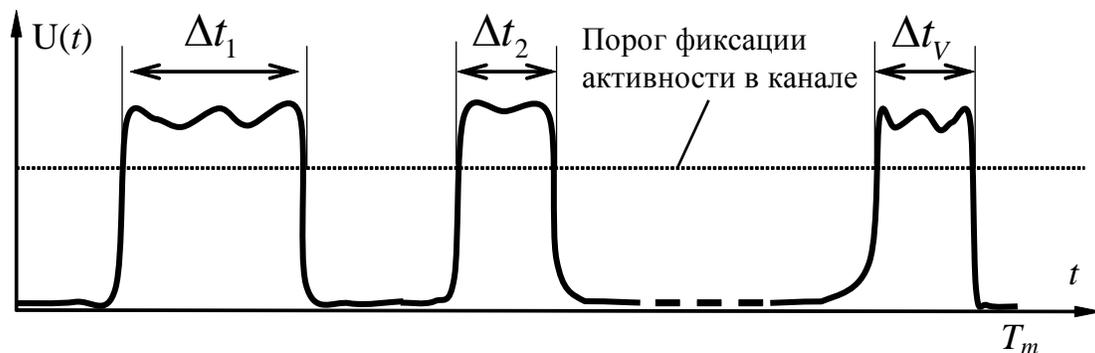
**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**  
**Предлагаемое содержимое подраздела «Понятие занятости спектра**  
**и управление точностью и достоверностью её оценивания»**

Под занятостью спектра понимается вероятность того, что в случайно выбранный момент времени анализируемый радиоканал, полоса частот или иной частотный ресурс будет использоваться для передачи информации.

При анализе занятости радиоканалов<sup>8</sup> считается, что возможны лишь два состояния канала: активное («занятое»<sup>9</sup>), при котором уровень сигнала в канале превосходит выбранный порог обнаружения<sup>10</sup>, и пассивное («свободное»<sup>11</sup>), когда уровень сигнала в канале мал. Занятость частотного радиоканала  $Z$  характеризует вероятность его пребывания в активном состоянии.

РИСУНОК 1

**К определению понятия занятости радиоканала**



На рисунке 1 представлен пример возможного изменения во времени уровня  $U(t)$  сигнала в канале на протяжении интервала измерений  $T_m$ . Вероятность того, что в случайно выбранной на оси времени точке контроля будет наблюдаться активное состояние канала, будет равна отношению **суммарной продолжительности интервалов активного состояния**<sup>12</sup>  $\Delta t_1, \Delta t_2 \dots \Delta t_v$  к продолжительности всего интервала измерений  $T_m$ . Таким образом, занятость канала на данном интервале измерений равна

<sup>8</sup> В последующем абзаце (абзацах) можно было бы конкретизировать признаки занятости других частотных ресурсов, однако настоящий вклад затрагивает в первую очередь вопросы достоверности измерений и, для определенности, концентрируется на измерении занятости именно радиоканалов. Расширение определения на иные ресурсы предполагается предложить членам корреспондентской группы и иным разработчикам.

<sup>9</sup> «Occupied» = «Active»

<sup>10</sup> Threshold

<sup>11</sup> «Free» = «Passive»

<sup>12</sup> Common duration of active state intervals

$$Z = \sum_{v=1}^V \Delta t_v / T_m, \quad (1)$$

где:

$Z$ : истинное значение занятости на текущем интервале измерений

$T_m$ : продолжительность интервала измерений<sup>13</sup>

$V$ : число случаев активного состояния радиоканала<sup>14</sup> на интервале  $T_m$

$\Delta t_1, \Delta t_2 \dots \Delta t_V$ : продолжительности интервалов активного состояния радиоканала.

### П1.1<sup>15</sup> Возникновение погрешности при оценке занятости

При контроле диапазонов частот, содержащих большое число радиоканалов, непрерывное наблюдение за каждым каналом оказывается проблематичным. Вместо этого аппаратура радиоконтроля, накапливая данные для оценки занятости, обычно производит проверку состояния каналов лишь эпизодически. Число  $J_m$  точек контроля состояния канала<sup>16</sup> на интервале измерения занятости определяется его продолжительностью  $T_m$  и величиной интервала между моментами контроля состояния канала<sup>17</sup>  $T_{rv}$  (который, в свою очередь, определяется быстродействием аппаратуры радиоконтроля и количеством радиоканалов, в которых производится измерение занятости).

При эпизодическом контроле состояния не удаётся точно определять моменты переключения канала из активного состояния в пассивное и обратно, поэтому при измерении занятости вместо точной формулы (1) приходится использовать приближенные оценки. Например, при равномерном размещении точек контроля состояния канала на оси времени для измерения занятости применяют оценку

$$\tilde{Z} = S_{\text{act}} / (S_{\text{act}} + S_{\text{pass}}),$$

где:

$\tilde{Z}$ : оценка занятости спектра

$S_{\text{act}}$ : число случаев фиксации активного состояния канала<sup>18</sup> на интервале измерений

$S_{\text{pass}}$ : число случаев фиксации пассивного состояния канала на интервале измерений.

Продемонстрируем возможную погрешность измерения занятости при изменении сигнала в канале согласно рисунку 2. Верхняя диаграмма  $U(t)$ , характеризующая изменение

<sup>13</sup> Measurement interval duration

<sup>14</sup> Number of active state intervals

<sup>15</sup> Разделы настоящего вклада, к сожалению, не могут иметь такую же нумерацию, как и разделы итогового Отчета по вопросам измерения занятости, поэтому для создания перекрёстных ссылок в текст вклада придется внедрять искусственные ссылки, «привязанные» к номерам приложений, образующих вклад.

<sup>16</sup> Number of samples

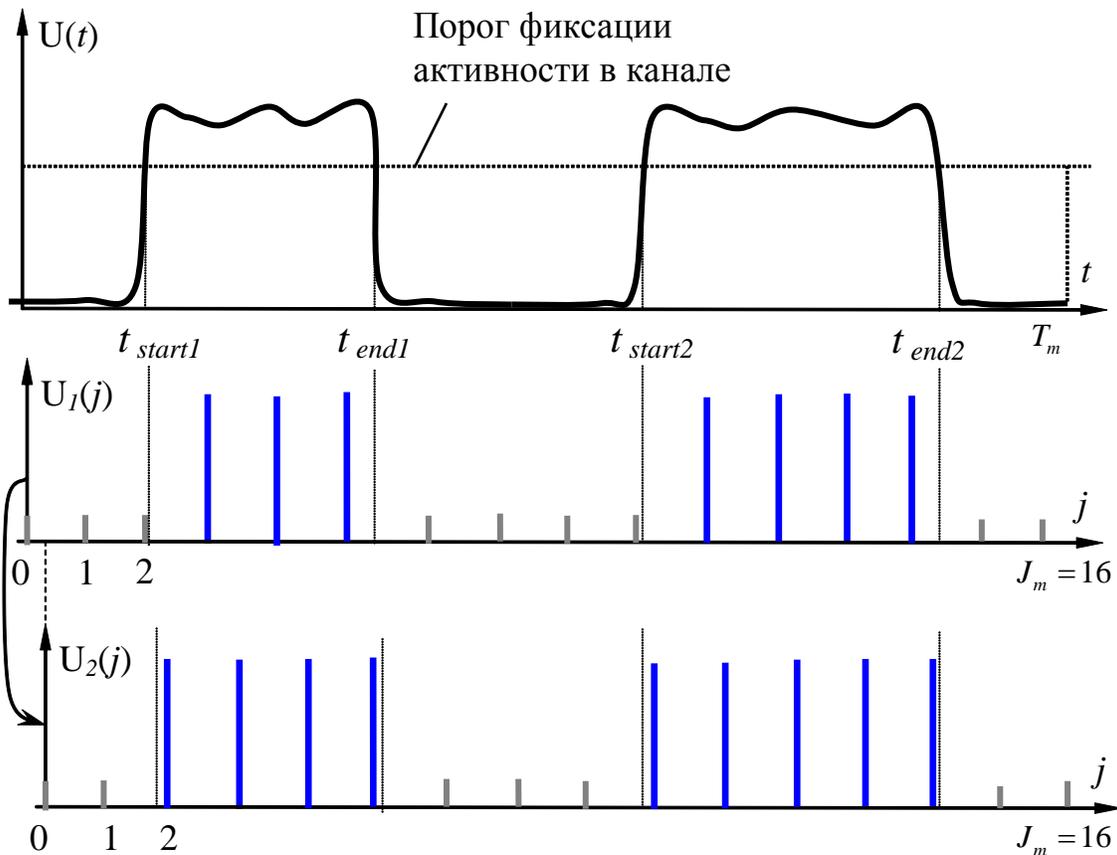
<sup>17</sup> Revisit time

<sup>18</sup> Number of fixed active samples (ориентировочный вариант)

уровня сигнала в канале непрерывно во времени, соответствует истинному значению  $Z \approx 50\%$ . Две следующие диаграммы иллюстрируют измерение занятости при одинаковом числе точек контроля  $J_m$ , но при разной «привязке» моментов начала отсчета времени. Из сопоставления диаграмм  $U_1(j)$  и  $U_2(j)$  видно, что измеренное значение занятости в первом случае будет равно  $\tilde{Z}_1 = 7/16 \approx 43,75\%$ , а во втором –  $\tilde{Z}_2 = 9/16 \approx 56,25\%$ .

РИСУНОК 2

### Возникновение погрешности при оценке занятости



Очевидно, что:

1) наряду с представленными 1-й и 2-й диаграммами возможны и другие варианты размещения начала отсчета, при которых на интервале измерений будет зафиксировано ровно 8 случаев активности канала, что даст точную оценку занятости  $\tilde{Z}_r = 8/16 = 50\%$ ;

2) увеличение числа точек контроля  $J_m$  снижает потенциальный разброс результатов измерений и позволяет гарантировать незначительную погрешность оценки занятости при произвольном выборе момента начала отсчета времени.

Итак, оценки занятости  $\tilde{Z}$  являются случайными величинами, а качество измерений занятости следует анализировать со статистических позиций.

### П1.2 Точность и надежность<sup>19</sup> оценки занятости

По рассмотренным в подразделе П1.1 причинам измерение занятости радиоканала на практике сопровождается появлением погрешности. Можно показать (см., например, [3]), что ошибка оценки занятости в отдельном  $r$ -м опыте  $\delta Z_r = (\tilde{Z}_r - Z)$  является случайной величиной с распределением, как правило, близким к нормальному. В отдельных опытах значения ошибок могут оказываться весьма значительными. Это означает, что требования к качеству оценивания занятости следует предъявлять с позиций точности и надежности.

Надежность  $P_z$  – это вероятность того, что оценка занятости  $\tilde{Z}$  будет отличаться от истинного значения  $Z$  не более чем на допустимую абсолютную погрешность  $\Delta_z$

$$P_z = P\left\{ \left| \tilde{Z} - Z \right| \leq \Delta_z \right\}, \quad (2)$$

где:

$P_z$ : надежность<sup>20</sup> оценки занятости

$Z$ : истинное значение занятости на интервале измерений

$\tilde{Z}$ : полученная для текущего интервала измерений оценка занятости

$\Delta_z$ : предельно допустимая абсолютная погрешность измерений<sup>21</sup>, составляющая половину доверительного интервала<sup>22</sup>.

Требования к точности часто выражают и через предельно допустимую относительную погрешность измерений<sup>23</sup>  $\delta_z$ , связанную с допустимой абсолютной погрешностью соотношением

$$\delta_z = \Delta_z / Z. \quad (3)$$

Ответ на вопрос о том, следует ли требования к точности оценивания выражать через абсолютную или через относительную погрешность, зависит от того, измерение каких значений занятости (малых или больших) оказывается наиболее важным на практике.

Ограничение предельно допустимой относительной погрешности измерений устанавливает повышенные требования (малую ширину доверительного интервала) к точности измерений в радиоканалах с низкой занятостью и ослабляет требования к точности оценивания для каналов с высокой занятостью. Например, при типовом значении  $\delta_z = 10\%$  для канала с занятостью  $Z = 2\%$  попадающими в доверительный интервал будут считаться значения

<sup>19</sup> Accuracy and confidence level

<sup>20</sup> Confidence level

<sup>21</sup> Absolute accuracy

<sup>22</sup> Confidence interval

<sup>23</sup> Relative accuracy

$1,8\% \leq \tilde{Z} \leq 2,2\%$  (ширина доверительного интервала 0,4 %), при занятости  $Z = 20\%$  ширина доверительного интервала увеличится до 4 %, а для канала с занятостью  $Z = 92\%$  будут считаться допустимыми любые значения оценок из интервала  $82,8\% \leq \tilde{Z} \leq 100\%$ .

При ограничении предельно допустимой абсолютной погрешности измерений ширина доверительного интервала оказывается не зависящей от реальной занятости канала. В частности, при рекомендуемом к практическому использованию значении  $\Delta_Z = 0,5\%$  ширина доверительного интервала остается равной 1 % как в каналах с низкой, так и с высокой занятостью. Это соответствует очень грубым оценкам для каналов с низкой занятостью и весьма точному оцениванию в каналах с высокой занятостью. В частности, при занятости  $Z = 92\%$  допустимыми считаются оценки, принадлежащие интервалу  $91,5\% \leq \tilde{Z} \leq 92,5\%$ .

Что касается требований к надежности, то к практическому использованию обычно рекомендуют значения из диапазона от 90 до 99 %. В настоящем Отчете в качестве базового будет в дальнейшем использоваться значение  $P_Z = 95\%$ .

### П1.3 Возможные варианты постановки задачи оценки занятости

Для правильного выбора методики измерения занятости необходимо различать следующие два варианта постановки задачи.

Первый вариант предполагает, что занятость канала может во времени изменяться. При этом:

- для контроля над изменениями следует делить ось времени на набор интервалов измерений  $T_{mr}$ . Эти интервалы измерений имеют фиксированную продолжительность, составляющую обычно 5 или 15 минут;
- для каждого  $r$ -го интервала измерений необходимо рассчитывать свою оценку занятости  $\tilde{Z}_r$ , определяемую активностью в канале именно на интервале  $T_{mr}$ ;
- для получения на каждом интервале достоверных<sup>24</sup> оценок занятости требуется использовать современные быстродействующие системы радиомониторинга;
- общая длительность контроля<sup>25</sup> определяется тем, на каком временном интервале нужно проанализировать изменения занятости, и, как правило, составляет целое число интервалов измерений  $T_{mr}$ .

Занятость, соответствующую изложенному варианту постановки задачи, можно называть **текущей**<sup>26</sup>. Вопросы обеспечения статистической достоверности измерений текущей занятости более подробно рассматриваются в разделе «Measuring procedure» и в приложениях А, В настоящего Отчета.

<sup>24</sup> valid

<sup>25</sup> Duration of monitoring

<sup>26</sup> Instant occupancy

Второй вариант предполагает, что занятость канала во времени не изменяется. При этом:

- наблюдаемые при практических измерениях отличия свойств канала на разных интервалах  $T_{m,r}$  следует считать случайными флуктуациями;
- целью измерений является оценка единственного показателя – **средней занятости**<sup>27</sup> канала, характеризующей его свойства вдоль всей временной оси;
- существует временной интервал, достаточный для оценки средней занятости канала с заданной статистической достоверностью и определяющий необходимую общую длительность контроля;
- жесткие требования к измерительной аппаратуре отсутствуют; её низкое быстродействие может быть скомпенсировано за счет увеличения длительности контроля.

Свойства оценки средней занятости канала подробно исследуются в статье [4], а рекомендации по обеспечению статистической достоверности оценки средней занятости канала можно найти, например, в таблице 1 документа [2]. Данные в этой таблице получены при ограничении предельно допустимой относительной погрешности измерений  $\delta_z$ . В соответствии с подразделом **П1.2** настоящего Отчета это устанавливает повышенные требования к точности измерений низких значений занятости и ослабляет точность измерений в каналах с высокой занятостью. Естественным следствием ограничения допустимой относительной погрешности является возможность быстро завершать измерения в каналах с высокой занятостью и необходимость осуществлять огромное число измерений в слабо занятых каналах.

## **П1.4 Параметры, влияющие на достоверность оценивания занятости**

### **П1.4.1 Интенсивность потока сигналов в радиоканале**

В работе [3] указывается, что точность и надежность оценок занятости существенно зависит от **количества сигналов**<sup>28</sup> (или числа случаев изменения состояния канала), приходящихся на интервал измерений. В приложении А к настоящему Отчету также содержатся примеры, показывающие, что при разном количестве сигналов, наблюдаемых на интервале измерений, необходимое для достоверного оценивания занятости число точек контроля может отличаться примерно на порядок.

---

<sup>27</sup> Average occupancy

<sup>28</sup> Transmissions number

Интенсивность потока сигналов<sup>29</sup>  $\lambda$  – это среднее число сигналов в канале, приходящееся на заданный интервал времени. Например, если в некотором канале на каждом 1-часовом интервале времени наблюдается в среднем 140 сеансов связи, то интенсивность потока сигналов для такого канала составляет  $\lambda = 140$  сигналов / час. Рекомендации по учету интенсивности потока сигналов при оценке занятости будут даны в П2.1.3.3.

Следует иметь в виду, что интенсивность потока сигналов в радиоканале  $\lambda$  для разных временных интервалов может существенно отличаться. Это означает необходимость осуществления по ходу измерений занятости слежения за изменением интенсивности потока сигналов и адаптации к этим изменениям параметров оценивания [3].

#### П1.4.2 Относительная нестабильность интервала контроля<sup>30</sup>

Существует ряд причин, которые могут приводить к неравномерному размещению точек контроля состояния канала на оси времени:

- При измерении занятости в каналах с существенно отличающимися интенсивностями потоков сигналов требуемое число точек контроля может различаться в 5...10 раз. Строго циклическая проверка состояния таких каналов неэффективна, а переход к гибкой процедуре перебора каналов будет приводить к неравномерному размещению точек контроля на оси времени.
- Быстродействие современных систем радиомониторинга весьма велико и при небольшом числе контролируемых каналов позволяет параллельно сбору данных для оценки занятости решать и другие задачи радиомониторинга, однако при подобном разделении аппаратных ресурсов расположение точек контроля на временной оси также становится неравномерным.

Возможны и иные причины, приводящие к нестабильности временного интервала между точками контроля состояния канала.

Пусть моменты времени  $t_j$  ( $1 \leq j \leq J_m$ ) соответствуют реальному размещению на оси времени точек контроля состояния канала. Интервалы  $T_{rvj}$  между точками

$$T_{rvj} = t_{j+1} - t_j, \quad 1 \leq j < J_m \quad (4)$$

на практике испытывают случайные флуктуации по отношению к среднему значению

$$T_{rv} = T_m / J_m . \quad (5)$$

где  $T_m$  : продолжительность интервала измерений  
 $J_m$  : число точек контроля на интервале измерений.

<sup>29</sup> Signals flow rate

<sup>30</sup> Revisit time relative instability

Относительной нестабильностью интервала контроля состояния называется величина  $\delta T$ , определяемая максимальным отклонением интервала между точками контроля от своего среднего значения. Она равна

$$\delta T = \max_j \left\{ |t_{j+1} - t_j| / T_{rv} \right\}, \quad 1 \leq j < J_m, \quad (6)$$

где  $\delta T$ : относительная нестабильность интервала контроля состояния  
 $t_j$ : реальные моменты времени контроля состояния канала  
 $T_{rv}$ : среднее значение интервала между точками контроля<sup>31</sup>, определяемое (5)  
 $J_m$ : число точек контроля на интервале измерений.

#### П1.4.3 Применение тактируемых и нетактируемых измерительных систем<sup>32</sup> для анализа радиоканалов с импульсными и протяженными сигналами<sup>33</sup>

Достоверность измерений занятости зависит от типовой продолжительности сигналов в анализируемом радиоканале, а при нестабильных интервалах контроля состояния ещё и от того, является ли применяемая измерительная система тактируемой или нетактируемой. При измерении текущей занятости протяженными считаются сигналы, длительность  $\Delta t_v$  которых составляет не менее тысячной доли интервала измерений, т.е. удовлетворяющие условию  $\Delta t_v \geq 10^{-3} \cdot T_m$ ; к импульсным относят сигналы с длительностью  $\Delta t_v < 10^{-4} \cdot T_m$ .

Особенностью тактируемых систем является использование высокоточного задающего генератора, определяющего на оси времени некую идеальную сетку контрольных моментов времени. Реальные точки контроля могут оказаться смещенными относительно узлов этой идеальной сетки, однако для точек, расположенных на разных участках интервала измерений, эти смещения – независимые.

Под нетактируемыми понимаются системы, в которых временная сетка отсутствует, измерения производятся через приблизительно одинаковые интервалы, а смещение любой из точек сказывается на расположении на оси времени всех последующих моментов контроля.

На коротких временных интервалах разница между поведением систем не слишком заметна, но при типовой длительности интервала измерений  $T_m$  составляющей сотни секунд, различия в расположении точек контроля на оси времени становятся существенными и заметно сказываются на статистических характеристиках оценок занятости в радиоканалах с протяженными сигналами. Рекомендации по обеспечению достоверности измерений для

<sup>31</sup> Average value of revisit time

<sup>32</sup> Lock-in and lock-out measurement systems

<sup>33</sup> Bursts (or pulse signals) and continuous signals (ориентировочный вариант)

тактируемых и нетактируемых систем будут даны в разделе «Measuring procedure». Достоверное измерение занятости в каналах с импульсными сигналами требует значительно большего количества точек контроля на интервале измерений, однако для таких сигналов разница между тактируемыми и нетактируемыми системами становится несущественной.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**  
**Предлагаемое содержимое подраздела**  
**«Measuring procedure / Frequency channel occupancy (FCO)»**

**П2.1 Рекомендации по измерению занятости применительно к тактируемым измерительным системам**

**П2.1.1 Сбор данных**

Для оценивания занятости минимально необходимо на каждом интервале измерений зафиксировать число  $S_{act}$  случаев наблюдения активного состояния канала, и число  $S_{pass}$  случаев пребывания канала в пассивном состоянии.

При преобладании в канале протяженных сигналов для контроля достоверности измерений необходима также информация об интенсивности потока сигналов  $\lambda$ . При отсутствии подобных сведений целесообразно контролировать группирование активных и пассивных состояний для фиксации количества  $V_r$  сигналов, наблюдавшихся в канале на  $r$ -м интервале измерений. Количество наблюдавшихся сигналов  $V_r$  считается равным числу переключений канала из пассивного состояния в активное и обратно.

**П2.1.2 Правило расчета оценки занятости**

Правило расчета оценки занятости уже обсуждалось ранее в подразделе П1.2 и имеет вид

$$\tilde{Z} = S_{act} / (S_{act} + S_{pass}), \quad (7)$$

где:

- $\tilde{Z}$  : оценка занятости спектра
- $S_{act}$  : число случаев фиксации активного состояния канала на интервале измерений
- $S_{pass}$  : число случаев фиксации пассивного состояния канала на интервале измерений.

**П2.1.3 Выбор количества точек контроля состояния**

**П2.1.3.1** Рекомендации по выбору числа точек контроля применительно к измерению средней занятости канала и к ограничению предельно допустимой относительной погрешности измерений  $\delta_z$  можно найти в документах [1, 2].

**П2.1.3.2** Описание статистических свойств оценок текущей занятости при ограничении предельно допустимой абсолютной погрешности измерений  $\Delta_z$  можно найти в Приложении В. Для каналов с протяженными и с импульсными сигналами достоверность измерений ведёт себя по-разному. Для каналов с протяженными сигналами она определяется в первую очередь

количеством сигналов, приходящихся на интервал измерений. Для каналов, занятых импульсными сигналами, достоверность зависит от самой величины занятости радиоканала.

**П2.1.3.3** Применительно к радиоканалам с протяженными сигналами количество точек контроля, необходимое для обеспечения надежности  $P_z = 95\%$  при максимально допустимой абсолютной погрешности измерений  $\Delta_z = 0,5\%$ , можно получить, подставив эти константы в общие соотношения (27)-(31) из приложения В. Правило обеспечения статистической достоверности измерений занятости принимает при этом вид

$$J_{m\ min} = 194,2 \cdot \sqrt{V_{avr} \cdot (1,06 + \delta T^2)}, \quad (8)$$

где:

$J_{m\ min}$ : рекомендуемое (минимально необходимое) количество точек контроля

$\delta T$ : относительная нестабильность интервала контроля состояния

$V_{avr}$ : среднее число сигналов, ожидаемых на интервале измерения занятости, равное

$$V_{avr} = \lambda \cdot T_m. \quad (9)$$

Здесь

$\lambda$ : интенсивность потока сигналов в канале (см. П1.4.1)

$T_m$ : продолжительность интервала измерений занятости.

Примеры применения правила (8) к радиоканалам с различной интенсивностью потока сигналов показаны в таблице 1. Отметим, что в соответствии с Приложением В для большинства современных систем радиоконтроля вносить поправки на зависимость между соседними результатами контроля состояний канала при измерениях занятости не требуется.

Согласно данным из таблицы 1 для каналов с протяженными сигналами и низкой занятостью (а, соответственно, и низкой интенсивностью потока сигналов  $\lambda$ ) статистически достоверные результаты оценивания получаются при количестве точек контроля  $J_m < 10^3$ , что отличается от сведений, приводимых в документах [1, 2]. Различия объясняются тем, что в приводимой здесь таблице 1 данные получены при ограничении не относительной, а абсолютной погрешности оценивания, что не предполагает сужения доверительного интервала для случаев низкой занятости радиоканалов (см. П1.2). В подразделе П1.1 установлено, что погрешность оценок занятости возникает из-за отсутствия точных данных о моментах переключения радиоканала из активного состояния в пассивное и обратно. Соответственно, чем больше таких моментов на интервале измерений, тем больше потенциальная ошибка измерений. Именно из-за этого для обеспечения статистической достоверности результатов соотношение (8) требует увеличивать количество точек контроля состояния канала не при росте занятости, но при увеличении среднего числа сигналов, ожидаемых в

канале за интервал измерений. Таким образом, при фиксации допустимой абсолютной ошибки измерений  $\Delta_z$  и для слабо занятых каналов, и для каналов с высокой занятостью, но редкой сменой состояния (например, занятых радиовещательными станциями), достаточно осуществлять лишь 632...703 проверок состояния. И лишь для каналов, характеризуемых многократным изменением состояния на интервале измерений, требуемое количество точек контроля состояния оказывается значительным.

ТАБЛИЦА 1

**Рекомендуемое количество точек контроля состояния канала с протяженными сигналами, необходимое для обеспечения абсолютной погрешности измерений занятости  $\Delta_z$  не более  $\pm 0,5$  % при надежности  $P_z = 95$  %**

<i>Интенсивность потока сигналов в канале <math>\lambda</math> (среднее число сигналов, наблюдаемых на интервале измерения занятости), не более</i>	<i>Рекомендуемое количество точек контроля</i>	
	<i>при равномерном размещении точек контроля на оси времени</i>	<i>при неравномерном размещении точек контроля <math>0,25 \leq \delta T \leq 0,5</math></i>
10	632	703
30	1095	1217
50	1414	1572
100	2000	2223
300	3463	3850
500	4471	4970

Примечание: Данные в правой колонке таблицы приведены в предположении применения оценки (7) в тактируемых измерительных системах, либо оценки (15) при нетактируемых измерениях.

Если интенсивность  $\lambda$  потока сигналов на интервале измерений занятости заранее неизвестна, то рекомендуется задаться некоторым значением, выбранным с запасом. Для уточнения интенсивности потока сигналов по ходу выполнения измерений рекомендуется применять соотношение [3]

$$\lambda_{(r+1)} = (w\lambda_r + V_r) / (w + 1), \quad (10)$$

где:

$\lambda_{(r+1)}$ : интенсивность потока, ожидаемая на следующем интервале измерений;

$\lambda_r$ : интенсивность потока для текущего (завершившегося) интервала измерений;

$V_r$ : число сигналов, зарегистрированное на текущем интервале измерений;

$w$ : весовой коэффициент, определяющий инерционность процедуры адаптации и выбираемый обычно из диапазона  $5 \leq w < 20$ .

**П2.1.3.4** Применительно к радиоканалам с импульсными сигналами количество точек контроля, необходимое для обеспечения надежности  $P_Z = 95\%$  при максимально допустимой абсолютной погрешности измерений  $\Delta_Z = 0,5\%$ , можно получить, подставив эти константы в общее соотношение (39) из приложения В. Правило обеспечения статистической достоверности измерений занятости принимает при этом вид

$$J_{m \min} = 153664 \cdot Z \cdot (1 - Z), \quad (11)$$

где:

$J_{m \min}$ : рекомендуемое (минимально необходимое) количество точек контроля

$Z$ : занятость радиоканала

При импульсном характере сигналов достоверность оценки (7) определяется самим значением занятости и практически не зависит от нестабильности распределения точек контроля вдоль оси времени, а также от тактируемого или нетактируемого характера измерений. Применение правила (11) к радиоканалам с различной занятостью иллюстрирует таблица 2.

**П2.1.4** Влияние неправильного выбора числа точек контроля на достоверность оценки занятости

Снижение числа точек контроля  $J_m$  в  $K$  раз по сравнению с рекомендациями таблиц 1, 2 влечет снижение надежности, либо пропорциональное  $K$  расширение доверительного интервала.

Пусть, к примеру, с использованием тактируемой измерительной аппаратуры, обеспечивающей размещение точек контроля с относительной нестабильностью  $0,25 \leq \delta T \leq 0,5$ , требуется измерить занятость радиоканала, интенсивность потока сигналов в котором составляет не более 50 сигналов за интервал измерений. Из последней колонки Таблицы 1 следует, что при этом рекомендуется проверять состояние канала 1572 раза. При выполнении этой рекомендации оценка занятости (7) с вероятностью  $P_Z = 95\%$  будет отличаться от истинного значения не более чем на  $\Delta_Z = 0,5\%$ . Пусть, однако, возможности аппаратуры реально обеспечивают на интервале измерений лишь 393 точки проверки состояния

канала, что в 4 раза меньше рекомендованного количества. Тогда в среднем занятость по-прежнему будет измеряться верно, однако интервал, в котором с вероятностью 95 % будет находиться истинное значение занятости, увеличится в 4 раза и составит  $\pm 2\%$  от результата измерений.

Недостаточное число точек контроля  $J_m$  может наблюдаться и при досрочном прерывании сбора данных для оценки занятости. В подобных случаях оценка занятости (7) остается несмещенной, однако достоверность результатов снижается аналогично рассмотренному выше примеру.

ТАБЛИЦА 2

**Рекомендуемое количество точек контроля состояния канала с импульсными сигналами, необходимое для обеспечения абсолютной погрешности измерений занятости  $\Delta_Z$  не более  $\pm 0,5\%$  при надежности  $P_Z = 95\%$**

Занятость радиоканала $Z, \%$	Рекомендуемое количество точек контроля $J_m$	Рекомендуемый интервал проверки состояния канала $T_{rv}, \text{мс}$	
		при $T_m = 5$ минут	при $T_m = 15$ минут
5	7300	41,1	123,2
10	13830	21,7	65,0
20	24586	12,2	36,6
35	34960	8,6	25,7
50	38416	7,8	23,4

Примечание: Необходимое количество точек контроля для каналов с занятостью  $Z^* > 50\%$  совпадает с числом точек для занятости  $Z = 1 - Z^*$ , т.е., в частности, для осуществления достоверных измерений в канале с занятостью 80 % необходимо выбирать  $J_m = 24586$ , как и в случае занятости  $Z = 1 - 0,80 = 20\%$ .

## П2.2 Рекомендации по измерению занятости применительно к нетактируемым измерительным системам

Правило (7) может использоваться для оценки занятости и в нетактируемых системах, однако статистическая достоверность оценивания занятости в таких системах по мере увеличения относительной нестабильности  $\delta T$  заметно ухудшается. Улучшить качество оценки можно при помощи точной фиксации тех моментов времени, когда оценивалось состояние радиоканалов. В целом, при измерениях следует контролировать не количество случаев активности и пассивности канала, а продолжительность пребывания канала в активном и пассивном состоянии.

### П2.2.1 Сбор данных

Для оценивания занятости минимально необходимо на каждом интервале измерений зафиксировать суммарную продолжительность пребывания канала в активном  $T_{\Sigma \text{ act}}$  и пассивном  $T_{\Sigma \text{ pass}}$  состояниях.

При старте измерений, следует установить  $T_{\Sigma \text{ act}} = 0$  и  $T_{\Sigma \text{ pass}} = 0$ , а также зафиксировать состояние канала, соответствующее точке  $t_0$ . Далее, если в точках контроля  $t_j$  и  $t_{j+1}$  наблюдалось пассивное состояние канала, то величина  $T_{\Sigma \text{ pass}}$  увеличивается на определяемую (4) длительность интервала  $T_{rv j}$  между точками контроля

$$T_{\Sigma \text{ pass}}(j) = T_{\Sigma \text{ pass}}(j-1) + T_{rv j}; \quad (12)$$

если в обеих точках состояние было активным, то увеличивается  $T_{\Sigma \text{ a}}$ :

$$T_{\Sigma \text{ act}}(j) = T_{\Sigma \text{ act}}(j-1) + T_{rv j}; \quad (13)$$

если же на интервале  $T_{rv j}$  наблюдалось изменение состояния канала, то корректируются обе величины:

$$T_{\Sigma \text{ pass}}(j) = T_{\Sigma \text{ pass}}(j-1) + T_{rv j}/2, \quad T_{\Sigma \text{ act}}(j) = T_{\Sigma \text{ act}}(j-1) + T_{rv j}/2. \quad (14)$$

Для контроля достоверности измерений целесообразно по аналогии с тактируемыми системами фиксировать количество сигналов, наблюдавшихся на интервале измерений занятости (см. П2.1.1 и П2.1.3.3).

### П2.2.2 Правило расчета оценки занятости

Правило расчета оценки занятости имеет вид

$$\tilde{Z} = T_{\Sigma \text{ act}} / (T_{\Sigma \text{ act}} + T_{\Sigma \text{ pass}}). \quad (15)$$

где:

- $\tilde{Z}$  : оценка занятости спектра на интервале измерений
- $T_{\Sigma \text{ act}}$  : суммарная продолжительность пребывания канала в активном состоянии
- $T_{\Sigma \text{ pass}}$  : продолжительность пребывания канала в пассивном состоянии.

### П2.2.3 Выбор количества точек контроля состояния

Описание статистических свойств оценки (15) можно найти в Приложении В. Фиксация продолжительности наблюдения активных и пассивных состояний канала предотвращает характерное для нетактируемых измерений накопление погрешности. В результате статистические характеристики оценки (15) для нетактируемых измерительных систем совпадают с качеством оценки (7) в системах тактируемых. Это означает, что необходимое для обеспечения надежности  $P_z = 95\%$  количество точек контроля может быть рассчитано по приведенным выше правилам (8), (11) или взято из таблиц 1-2.

Использовать при нетактируемых измерениях оценку (7), в принципе, допустимо, однако количество точек контроля, необходимое для обеспечения достоверности измерений, с ростом относительной нестабильности интервала контроля состояния резко возрастает. Соответствующие расчетные соотношения можно найти в Приложении В.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Предлагаемое содержимое Приложения А итогового Отчета по измерению занятости

#### Приложение А

#### Типовые примеры влияния на надежность оценки занятости спектра интенсивности потока сигналов в радиоканале

В настоящем Приложении приведены примеры, указывающие на важность слежения за интенсивностью потока сигналов в радиоканалах для получения оценок занятости, обладающих высокой точностью и надежностью. Анализируются случаи оценки занятости в радиоканалах с существенно отличающимся числом интервалов активности (сеансов связи) на интервале измерений. Во всех сопоставляемых случаях истинное значение занятости остается одним и тем же и составляет  $Z = 5\%$ . Требования, предъявляемые к точности, характеризуются максимально допустимой абсолютной погрешностью измерений  $\Delta_Z = 0,5\%$ , что при  $Z = 5\%$  одновременно соответствует относительной погрешности  $\delta_Z = 10\%$ .

Случай «А». Наличие единственного сигнала на интервале измерений

Пусть на интервале  $T_m$  измерения занятости в канале может наблюдаться лишь единственный сигнал с длительностью  $T_S = 0,05 \cdot T_m$ , что соответствует занятости  $Z = 5\%$ . Убедимся, что для обеспечения надежности  $P_Z = 100\%$  при равномерном размещении точек контроля на оси времени достаточно выполнять лишь  $J_m \geq 200$  измерений.

Действительно, при определяемом (5) периоде  $T_{rv}$  проверки состояния канала на интервале  $T_S$  действия сигнала будут располагаться либо

$$S_{act\ min} = \text{int}[T_S \cdot J_m / T_m] = \text{int}[0,05 \cdot J_m], \quad (16)$$

где  $\text{int}[\cdot]$  – операция взятия целой части числа, либо  $(S_{act\ min} + 1)$  точек контроля состояния.

Учитывая правило (7) и то, что  $(S_{act} + S_{pass}) = J_m$ , для погрешности оценки занятости в  $r$ -м опыте получаем

$$\delta Z_r \leq \delta Z_{max} = \max \left( 0,05 - \frac{S_{act\ min}}{J_m}; \frac{S_{act\ min} + 1}{J_m} - 0,05 \right). \quad (17)$$

Для  $J_m \geq 200$  максимальная абсолютная погрешность, реально достигаемая в соответствии с (18), составляет  $|\delta Z_{max}| = 0,005$ , что и соответствует относительной погрешности в  $10\%$ .

Отметим также, что при  $J_m \geq 600$  из (18) получаем  $|\delta Z_{max}| = 0,00167$ , что (при  $Z = 5\%$ ) соответствует относительной погрешности менее чем в 3,5% (при 100%-ной надежности).

Случай «В». Двенадцать сигналов на интервале измерений

Пусть теперь на интервале  $T_m$  располагаются 12 радиоимпульсов одинаковой длительности  $T_s = 0,00417 \cdot T_m$ , что вновь соответствует занятости  $Z = 5\%$ . При числе точек контроля  $485 \leq J_m < 715$  длительность радиоимпульсов остается больше интервала контроля  $T_{rv\ avr}$ , так что каждый импульс в зависимости от положения по отношению к «сетке» точек контроля будет представлен либо двумя  $S_{act\ min} = T_s / T_{rv\ max} = \text{int}[0,00417 \cdot J_{m\ min}] = 2$ , либо тремя  $S_{act\ max} = \text{int}[0,00417 \cdot J_{m\ max}] + 1 = 3$  активными состояниями. При  $J_m \approx 500$  чаще будут возникать пары точек активного состояния канала, при  $J_m \approx 700$  состояния активности чаще будут группироваться тройками.

Рассмотрим подробнее случай  $J_m = 600$ , при котором оба варианта группирования точек будут равновероятными. Общее число регистрируемых случаев активности  $S_{act}$  может в анализируемой ситуации изменяться от  $S_{act\ min} = 12 \cdot 2 = 24$  до  $S_{act\ max} = 12 \cdot 3 = 36$ . В опытах, где величина  $S_{act}$  будет находиться в диапазоне от 27 до 33, получаемая в соответствии с (7) оценка занятости будет укладываться в пределы  $\pm 10\%$ -ной относительной погрешности. Вероятность же получения  $24 \leq S_{act} \leq 26$  или  $34 \leq S_{act} \leq 36$  может быть вычислена по правилу

$$P_{error} = 0,5^{12} \cdot (C_{12}^0 + C_{12}^1 + C_{12}^2 + C_{12}^{10} + C_{12}^{11} + C_{12}^{12}) = \frac{2 \cdot (1 + 12 + 66)}{4096} \approx 3,86\% . \quad (18)$$

Здесь  $C_{12}^k$  соответствует  $k$  случаям фиксации пар активных состояний при наблюдении очередного из 12 радиоимпульсов.

Итак, при той же занятости  $Z = 5\%$ , что и в случае «А», и при таком же числе точек контроля состояния канала  $J_m = 600$  оценка занятости  $\tilde{Z}$  хотя и удовлетворяет требованиям документов [1, 2], но, всё же, с вероятностью почти в 4% может отклоняться от истинного значения  $Z$  более чем на  $\pm 10\%$  относительной погрешности.

Случай «С». Несколько десятков сигналов на интервале измерений

Пусть, наконец, на интервале  $T_m$  размещаются 80 радиоимпульсов одинаковой длительности  $T_s = 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot T_m$ , что вновь дает  $Z = 5\%$ . При  $J_m = 600$  интервал контроля

состояния канала составит  $T_{rv} \approx 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot T_m$ . При этом любой из импульсов будет представлен не более чем единственным состоянием активности, а с вероятностью  $P_{miss} = 1 - T_S / T_{rv} \approx 62,5\%$  будет просто пропущен! Означает ли это, что выполнить оценку занятости теперь уже невозможно?

Пренебрегая вероятностью взаимного наложения радиоимпульсов и полагая случаи «обнаружения» импульсов независимыми, для математического ожидания числа случаев активности  $S_{act}$  получаем

$$m_I \{S_{act}\} = 80 \cdot (1 - P_{miss}) = 80 \cdot 0,375 = 30 \quad (19)$$

и, как следствие,

$$m_I \{\tilde{Z}\} = 30 / 600 = 0,05. \quad (20)$$

Таким образом, среднее значение оценки занятости остаётся несмещенным. Объясняется это тем, что хотя часть радиоимпульсов будет реально пропускаться, остальные, по сути, будут учитываться не как обладающие длительностью  $T_S$ , а как имеющие протяженность  $T_{rv}$ , что и компенсирует предыдущий эффект.

Для анализа качества оценки занятости в новых условиях учтем, что соответствующие относительной погрешности в  $\pm 10\%$  результаты будут получаться лишь при числе обнаруженных сигналов, лежащем в диапазоне от 27 до 33. Реальное число обнаруженных сигналов будет случайной величиной, подчиняющейся биномиальному распределению. Учитывая, однако, что при достаточно большом общем числе обнаруживаемых импульсов  $n = 80$  это распределение может быть аппроксимировано нормальным, для надежности оценки получаем расчетное выражение

$$P_{\tilde{Z}} = F_{ct} \left( \frac{33-30}{4,33} \right) - F_{ct} \left( \frac{27-30}{4,33} \right) \approx F_{ct}(0,7) - F_{ct}(-0,7) \approx 52\%. \quad (21)$$

где  $F_{ct}(z)$  - функция распределения вероятности стандартной нормальной случайной величины

$$F_{ct}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (22)$$

$\sigma = \sqrt{80 \cdot 0,375 \cdot 0,625} \approx 4,33$  - среднеквадратическое отклонение оценки  $\tilde{Z}$ .

Итак, при большом числе коротких импульсов на интервале измерения получаемые значения занятости в среднем будут близкими к реальности, но надежность оценки оказывается низкой (в нашем случае  $P_{\tilde{Z}} \approx 52\%$ ).

Рассмотренные выше примеры показывают, что для радиоканалов, в которых действуют протяженные сигналы, надежность оценки занятости зависит в первую очередь не от самого значения занятости, а от числа изменений состояния анализируемого канала на интервале измерений. При редкой смене состояния радиоканала даже небольшое количество контрольных точек обеспечивает относительно точное и надежное измерение занятости. При частой смене состояния канала обеспечить точное и надежное измерение занятости можно лишь за счет существенного повышения числа точек контроля на интервале измерений.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Предлагаемое содержимое Приложения В итогового Отчета по измерению занятости

#### Приложение В

#### Статистические характеристики оценки занятости радиоканала

В настоящем Приложении приведены краткие сведения о статистических характеристиках оценок занятости радиочастотного спектра.

##### В1 Общие положения

Основной причиной возникновения погрешности при оценивании занятости оказывается отсутствие точных данных о моментах переключения канала из активного состояния в пассивное и обратно из-за ограниченного числа точек контроля на интервале измерений. Каждый случай переключения добавляет к значению оценки занятости случайную поправку. Сопоставимость по величине и обычно имеющая место статистическая независимость подобных слагаемых приводят к проявлению эффекта нормализации. Числовые характеристики распределения ошибки оценки занятости зависят от размещения на оси времени точек контроля и от длительности сигналов, действующих в радиоканале.

##### В2 Свойства оценки занятости для каналов с протяженными радиосигналами при равномерном размещении точек контроля на оси времени

При оценивании занятости протяженными считаются сигналы, имеющие длительность  $\Delta t_v \geq 10^{-3} \cdot T_m$ . При действии в радиоканале подобных сигналов точки переключения состояния по отношению к точкам контроля, как правило, располагаются на разных, независимых интервалах, а оценка занятости оказывается случайной величиной с распределением близким к нормальному. При равномерном размещении  $J_m$  точек контроля на оси времени математическое ожидание оценки занятости равно  $m_1 \{ \tilde{Z} \} = Z$ , а эффективное значение определяется в первую очередь количеством  $I$  переключений состояния канала на интервале измерений [3]

$$\sigma_{\tilde{z}} \approx \sqrt{\frac{I}{3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot J_m}. \quad (23)$$

С учетом этого, надежность оценки (7) в первом приближении определяется выражением

$$P_{\tilde{z}} \approx \Phi(\Delta_z / \sigma_{\tilde{z}}), \quad (24)$$

где  $\Phi(z)$  - интеграл вероятности

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (25)$$

При измерении занятости, значения которой лежат в диапазоне  $0,2 \leq Z \leq 0,8$ , приведенные выше аппроксимации (24)-(25) оказываются достаточно точными. При измерении больших и малых значений занятости проявляется отклонение поведения величины  $\tilde{Z}$  от нормального, что приводит к незначительному снижению надежности по сравнению с результатами применения (25). Число точек контроля состояния каналов, необходимых для обеспечения заданной точности и надежности оценок, можно рассчитывать как

$$J_m = k_Z(\tilde{Z}) \cdot \frac{x_p}{\Delta_Z} \cdot \sqrt{\frac{V_{avr}}{6}}, \quad (26)$$

где  $J_m$ : рекомендуемое (необходимое) число точек контроля на интервале измерений  
 $V_{avr}$ : среднее число сигналов, ожидаемых в канале на интервале измерений (см. П2.1.3.3)  
 $k_Z$ : поправочный коэффициент, отражающий степень отклонения распределения оценки надежности от нормального [3]  
 $\Delta_Z$ : максимально допустимое отклонение оценки занятости от истинного значения, составляющее половину доверительного интервала  
 $x_p$ : процентная точка интеграла вероятности  $\Phi(x)$ , соответствующая требуемой надежности  $P_Z$ , для расчета которой можно на основе (26.2.22) из [5, с. 729] рекомендовать аппроксимацию

$$x_p = y - \frac{2,30753 + y \cdot 0,27061}{1 + y \cdot (0,99229 + y \cdot 0,04481)}, \quad (27)$$

где  $y = \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{2}{1 - P_Z}\right)}$ . (28)

Значение входящего в соотношение (27) поправочного коэффициента  $k_Z(\tilde{Z})$  не превышает  $k_Z = 1,2$ . Это означает, что при постоянном применении подобного коэффициента (вне зависимости от реальной занятости анализируемого радиоканала) проигрыш в трудоемкости не будет превышать 20 %, что допустимо на практике. В результате, при равномерном размещении точек контроля на оси времени для расчета их числа можно рекомендовать правило

$$J_m = \frac{x_p}{\Delta_Z} \cdot \frac{\sqrt{V_{avr}}}{2}. \quad (29)$$

### В3 Учет нестабильности временного интервала между точками контроля

Нестабильность интервала между точками контроля приводит к возрастанию среднеквадратического отклонения оценки  $\tilde{Z}$ .

Пусть в тактируемой измерительной системе случайные смещения точек контроля относительно узлов идеальной временной сетки характеризуются равномерным распределением. Относительной нестабильности интервала контроля  $\delta T$  соответствуют предельно допустимые отклонения точек контроля равные  $\pm 0,5 \cdot \delta T \cdot T_m / J_m$  и квадратичный по отношению к  $\delta T$  рост дисперсии оценки занятости. В результате, для тактируемых систем, использующих оценку занятости (7), можно рекомендовать следующее правило расчета необходимого количества точек контроля<sup>34</sup>

$$J_m = \frac{x_p}{\Delta_z} \cdot \frac{\sqrt{V_{avr} \cdot (1,06 + \delta T^2)}}{2}, \quad (30)$$

В нетактируемых измерительных системах из-за накопления смещений вариация расположения точек на протяженных участках оси времени может быть заметно выше, чем для систем тактируемых, а среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\tilde{z}}$  оценки занятости (7) оказывается зависящим и от среднего числа протяженных сигналов  $V_{\text{нб}}$ , наблюдаемых в радиоканале на интервале измерений, и от занятости  $Z$  радиоканала. При равномерном распределении длительности интервала контроля в диапазоне от  $(1 - \delta T) \cdot T_m / J_m$  до  $(1 + \delta T) \cdot T_m / J_m$  величина  $\sigma_{\tilde{z}}$  приближенно определяется соотношением

$$\sigma_{\tilde{z}} \approx \frac{1}{J_m} \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{нб}}}{6} + \{0,54 - |0,5 - Z|\} \cdot \frac{2 \cdot J_m \cdot \delta T^2}{9}}, \quad (31)$$

- где
- $J_m$  : число точек контроля на интервале измерений
  - $V_{avr}$  : среднее число сигналов, приходящееся на интервал измерений
  - $\delta T$  : относительная нестабильность интервала контроля состояния (6)
  - $\sigma_{\tilde{z}}$  : среднеквадратическое отклонение оценки занятости (7)

Как правило, среднеквадратическое отклонение, определяемое (32), существенно превышает аналогичное значение для системы тактируемой.

<sup>34</sup> Ранее для учета влияния нестабильности размещения точек контроля авторами предлагалось использование поправочного коэффициента  $1/\sqrt[3]{1 - \delta T}$ , определенного экспериментальным путем, однако этот коэффициент был получен применительно к возможным смещениям точек контроля  $\pm \delta T \cdot T_m / J_m$ , что не соответствует определению (6) величины  $\delta T$ . Сопоставляя новый поправочный коэффициент из (31) с зависимостью  $1/\sqrt[3]{1 - 0,5 \cdot \delta T}$ , несложно убедиться, что их относительная погрешность не превышает 5%.

Если же в нетактируемой измерительной системе для определения занятости применяется оценка (15), то фиксация продолжительности активных и пассивных состояний канала предотвращает накопление погрешности. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\bar{z}}$  оценки (15) для каналов с протяженными сигналами определяется соотношением

$$\sigma_{\bar{z}} \approx \frac{1}{J_m} \cdot \sqrt{\frac{V_{\bar{z}}}{6} \cdot (1,06 + \alpha \cdot \delta T^2)}, \quad (32)$$

где для нетактируемых измерительных систем коэффициент  $\alpha = 1,0$ , а для тактируемых систем  $\alpha = 0,4$ .

Итак, нестабильность временного интервала между точками контроля оказывает наименьшее влияние на достоверность оценки занятости (15) в тактируемых измерительных системах и одинаково сказывается на качестве оценивания при использовании в нетактируемых системах оценки (15), а в тактируемых - оценки занятости (7). Использовать же оценку (7) в нетактируемых системах не рекомендуется; в соответствии с (32) для обеспечения достоверности измерений при этом потребуется существенно большее количество точек контроля.

#### В4 Упрощенный вариант расчета числа точек контроля на интервале измерений

Соотношение (31) может применяться, если известна типовая для используемой аппаратуры мониторинга относительная нестабильность интервала контроля  $\delta T$ . При отсутствии данных о величине нестабильности  $\delta T$  можно либо определять её по ходу измерений, либо ориентироваться на некое выбранное с запасом значение. Например, для  $\delta T \approx 0,5$  по из (31) получим

$$J_m = \frac{x_p}{\Delta_z} \cdot \frac{\sqrt{V_{avr}}}{1,75}. \quad (33)$$

Учтем, наконец, что значению надежности  $P_z = 95\%$  соответствует значение процентной точки интеграла вероятности  $\Phi(x)$   $x_p \approx 2,0$ . При рекомендованной в настоящем Отчете максимально допустимой погрешности  $\Delta_z = 0,5\%$  это (применительно к  $\delta T \leq 0,5$ ) позволяет получить практическую формулу расчета количества необходимых точек контроля

$$J_{\min} \approx 222 \cdot \sqrt{V_{avr}}. \quad (34)$$

### В5 Достоверность оценки занятости в каналах, содержащих импульсные сигналы

Пусть  $A_j$  – случайное событие, предполагающее регистрацию в канале активного состояния в контрольной точке  $t_j$ . Если длительности сигналов в канале  $\Delta t_v < 10^{-4} \cdot T_m$  оказываются меньше интервала  $T_m$  между точками контроля состояния канала, то совокупность случаев фиксации активного состояния на произвольном подмножестве точек контроля представляет собой набор независимых событий, вероятности которых совпадают и равны

$$P\{A_j\} = Z. \quad (35)$$

При известном количестве  $J_m$  точек контроля на интервале измерений  $T_m$  число  $S_{\text{act}}$  случаев фиксации активного состояния будет представлять собой биномиально распределенную случайную величину с числовыми характеристиками

$$m_l\{S_{\text{act}}\} = J_m \cdot Z, \quad D\{S_{\text{act}}\} = J_m \cdot Z \cdot (1 - Z). \quad (36)$$

Оценку (7) при этом, как правило, можно считать имеющей близкое к нормальному распределение с числовыми характеристиками

$$m_l\{\tilde{Z}\} = Z, \quad D\{\tilde{Z}\} = \sigma_z^2 = Z \cdot (1 - Z) / J_m. \quad (37)$$

Таким образом, и для каналов с импульсными сигналами оценка (7) является несмещенной оценкой занятости, надежность которой определяется соотношением (25). Выражая из (38) необходимое количество точек контроля  $J_m$  как функцию величин  $\Delta_z$  и  $P_z$ , имеем

$$J_m = Z \cdot (1 - Z) \cdot \left( \frac{x_p}{\Delta_z} \right)^2, \quad (38)$$

где  $x_p$  – процентная точка интеграла вероятности  $\Phi(x)$ , определяемая (28)-(29).

### В6 О зависимости состояний в точках контроля при измерениях занятости

При измерении занятости радиоканалов существует целый ряд настроек (факторов), влияющих на всю проводимую серию замеров. В частности, на результаты измерения занятости будут влиять географическое расположение устройства радиоконтроля, чувствительность приемной аппаратуры, выбранный порог разделения состояний канала на активное и пассивное. Однако на надежность оценки, характеризующей занятость для конкретного порога обнаружения в конкретной географической точке, все эти факторы влияния не оказывают.

Необходимость учёта взаимной зависимости точек контроля возникает в тех случаях, когда контроль состояния канала сопровождается изменением внутреннего состояния аппаратуры радиоконтроля, что, в свою очередь, оказывает влияние на результаты одного или

нескольких последующих измерений. Рассмотрим две соседние  $j$ -ю и  $(j+1)$ -ю точки контроля состояния канала, и пусть на самом деле в момент времени  $t_j$  канал занят (находится в активном состоянии), а в момент времени  $t_{j+1}$  - свободен (находится в пассивном состоянии). Если особенности измерительной аппаратуры таковы, что после фиксации в  $j$ -й точке контроля активного состояния канала, увеличивается вероятность фиксации активного состояния и в  $(j+1)$ -й точке, несмотря на то, что истинным для неё является пассивное состояние, то для компенсации подобной зависимости число выполняемых измерений на интервале контроля необходимо увеличивать, о чем говорится в [1, 2]. Если же аппаратура радиоконтроля несколько раз подряд фиксирует активное состояние канала лишь потому, что канал действительно находится в этом состоянии, то вводить поправки на взаимозависимость измерений не требуется.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Предлагаемое пополнение раздела «Definitions» Отчета по измерению занятости

- **Занятость радиоканала** Frequency channel occupancy (FCO)

Вероятность того, что в случайно выбранный момент времени радиоканал используется для передачи информации, признаком чего считается наблюдение в канале сигнала, уровень которого превышает порог (Threshold)

- **Текущая занятость спектра** Instant occupancy

Значение занятости, соответствующее конкретному, ограниченному по протяженности интервалу времени и, как следствие, подлежащее оценке на каждом подобном интервале

- **Средняя занятость спектра** Average occupancy

Среднее на неограниченном временном интервале значение занятости, по отношению к которому отклонения текущей занятости считаются случайными флуктуациями

- **Надежность оценки (доверительная вероятность)** Confidence level of estimation

Вероятность того, что оценка занятости будет отличаться от истинного значения не более чем на допустимую абсолютную (или относительную) погрешность измерений

- **Тактируемая измерительная система** Lock-in measurement system

Система, в которой расположение точек контроля на оси времени определяется тактовым генератором, а наблюдаемые на практике их отклонения от идеально равномерной временной сетки – независимы.

- **Нетактируемая измерительная система** Lock-out measurement systems

Система, в которой временная сетка отсутствует, контроль состояния производится через приблизительно одинаковые интервалы, а смещение любой из точек контроля сказывается на расположении на оси времени и всех последующих измерений

- **Протяженные сигналы (передачи)** Continuous signals (transmissions) (ориентировочный вариант)

Сигналы, длительность которых превышает средний интервал между повторными измерениями (точками контроля состояния радиоканала)

- **Импульсные сигналы (передачи)** Bursts (ориентировочный вариант)

Сигналы, длительность которых заметно меньше среднего интервала между повторными измерениями.

• **Интенсивность потока сигналов** Signals flow rate

Число сигналов (transmissions), наблюдаемых в радиоканале в среднем за единицу времени.

• **Относительная нестабильность интервала контроля** Revisit time relative instability

Отношение максимального отклонения от его среднего значения продолжительности интервала между точками контроля к самому этому среднему значению

## Литература

1. **Справочник** по радиоконтролю: МСЭ 2010.
  2. **Рекомендация МСЭ-R SM.1880.** Spectrum occupancy measurement.
  3. **Козьмин В. А., Токарев А. Б.** Методика оценивания занятости частотного спектра автоматизированным сервером радиоконтроля // Измерительная техника. 2009. № 12.  
<http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s11018-010-9442-9>
- V. A. Kozmin, A. B. Tokarev A method of estimating the occupancy of the frequency spectrum of an automated radio-control server in the following paginated issue of Measurement Techniques: Volume 52, Issue 12 (2009), Page 1336.
4. **Spaulding, A.D. and Hagn, G.H.** [August 1977] On the definition and estimation of Spectrum Occupancy. IEEE Trans. On EMC, Vol. EMC-19, No. 3, p. 269-280
  5. **Справочник по специальным функциям.** Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
-