

## **Оценивание занятости частотного спектра при нестабильном интервале контроля состояния радиоканалов**

**А. Б. ТОКАРЕВ**

ЗАО «Иркос», Москва, Россия, e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru

*Рассмотрена расширенная методика контроля занятости радиочастотного спектра на случай использования измерительной аппаратуры для параллельного решения нескольких задач радиоконтроля.*

**Ключевые слова:** радиочастотный спектр, контроль занятости, нестабильный интервал.

*The improved method of radiofrequency occupation control using the measuring devices for parallel solution of several radiocontrol tasks, is described.*

**Key words:** radiofrequency spectrum, occupation control, unstable interval.

Контроль занятости радиочастотного спектра осуществляется службами радиоконтроля для повышения эффективности управления данным ресурсом, однако нормативные документы [1, 2], определяющие порядок измерения, к сожалению, не соответствуют в полной мере потребностям практики [3]. В частности, в этих документах не рассматривается случай использования современных быстродействующих систем радиомониторинга [4] для параллельного решения многих задач радиоконтроля. Вместе с тем использовать такие системы исключительно для решения задачи оценивания занятости частот, как правило, нецелесообразно. Например, производимые в России панорамные измерительные приемники, входящие в семейство «АРГАМАК», обеспечивают скорость спектрального анализа до 3 ГГц в секунду [5]. Как будет показано ниже, это потенциально позволяет контролировать занятость в полосе частот шириной до 1 ГГц, что обычно заметно превышает имеющиеся на прак-

тике потребности и означает либо заметное недоиспользование возможностей аппаратуры, либо необходимость распределения измерительных ресурсов между разными задачами.

Кроме того, необходимо учитывать, что при распределении ресурсов системы между задачами поступление сведений о текущем состоянии контролируемых каналов может происходить неравномерно во времени, а это влияет на достоверность получаемых оценок занятости. Цель настоящей работы — расширение методики измерений [3] для обеспечения необходимого качества оценивания занятости в условиях неравномерного распределения точек контроля вдоль оси времени.

**Модификация оценки занятости при нестабильном интервале контроля состояния радиоканалов.** Занятость радиоканала (области частот) определяет долю времени, в течение которого в данном канале (области частот) дей-

ствуют активные радиосигналы. Классическая методика оценки занятости подробно рассматривается в [1—3]; она подразумевает периодический контроль состояния канала на протяжении интервала измерений  $T_{\text{и}}$  и расчет оценки занятости по правилу

$$\tilde{Z}^* = S_a / (S_a + S_0), \quad (1)$$

где  $S_a$ ,  $S_0$  — число случаев фиксации на интервале  $T_{\text{и}}$  активного и пассивного состояний канала.

При равномерном размещении на оси времени точек контроля состояния радиоканалов такой подход характеризуется как простотой, так и эффективностью. Однако нетрудно убедиться, что при нестабильном временном интервале проверки качество оценивания занятости по отношению к (1) может быть улучшено. А именно, если временной интервал  $T_{\text{н}j} = t_j - t_{j-1}$  между точками проверки состояния канала не является строго фиксированным, то для повышения точности оценивания занятости следует контролировать не число случаев активности и пассивности канала, а суммарную продолжительность пребывания канала в активном  $T_{\Sigma a}$  и пассивном  $T_{\Sigma 0}$  состояниях. Для этого, начиная анализ очередного интервала измерений  $T_{\text{и}}$ , следует установить  $T_{\Sigma a} = 0$  и  $T_{\Sigma 0} = 0$ , а также зафиксировать состояние канала, соответствующее точке  $t_0$ . Далее, если как в точке  $t_{j-1}$ , так и в  $t_j$  наблюдалось пассивное состояние канала, то увеличивается значение  $T_{\Sigma 0}$ :

$$T_{\Sigma 0}^{(j)} = T_{\Sigma 0}^{(j-1)} + T_{\text{н}j};$$

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

$$T_{\Sigma a}^{(j)} = T_{\Sigma a}^{(j-1)} + T_{\text{н}j};$$

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

$$T_{\Sigma 0}^{(j)} = T_{\Sigma 0}^{(j-1)} + T_{\text{н}j} / 2; \quad T_{\Sigma a}^{(j)} = T_{\Sigma a}^{(j-1)} + T_{\text{н}j} / 2.$$

Итоговая оценка занятости рассчитывается по правилу

$$\tilde{Z} = T_{\Sigma a} / (T_{\Sigma a} + T_{\Sigma 0}). \quad (2)$$

Заметим, что при равноотстоящих точках  $t_j$  контроля состояния канала результаты расчета по формулам (1) и (2) оказываются эквивалентными.

**Влияние нестабильности интервала контроля на характеристики погрешности оценки занятости.** В [3] было показано, что погрешность измерения занятости  $\eta = \tilde{Z} - Z$  является центрированной случайной величиной с распределением, близким к нормальному, и средним квадратическим отклонением (СКО)  $\sigma_{\eta}$ , пропорциональным  $\sqrt{I}$  ( $I$  — число переключений состояния канала на интервале измерений  $T_{\text{и}}$ ) и обратно пропорциональным числу точек контроля со-

стояния канала  $J_{\text{и}}$ . Нестабильность интервала между точками контроля приводит к возрастанию СКО  $\sigma_{\eta}$ . Точный расчет увеличения  $\sigma_{\eta}$  оказывается достаточно проблематичным, однако статистическое исследование характеристик погрешности  $\eta$  показывает, что при равномерном распределении интервала контроля в диапазоне от  $(1 - \delta T) T_{\text{и}} / J_{\text{и}}$  до  $(1 + \delta T) T_{\text{и}} / J_{\text{и}}$  влияние указанной нестабильности можно с приемлемой для практики степенью точности учесть поправочным коэффициентом  $1 / \sqrt[3]{1 - \delta T}$ . Взяв за основу (15) из [3], для расчета  $\sigma_{\eta}$  можно предложить соотношение

$$\sigma_{\eta} \approx \frac{1}{2J_{\text{и}} \sqrt[3]{1 - \delta T}} \sqrt{\frac{I}{3}},$$

где  $\delta T$  — относительная нестабильность размещения точек контроля.

В итоге выражение для расчета рекомендуемого числа точек контроля приобретает вид

$$J_{\text{и}} = \frac{k_Z(\tilde{Z})}{\sqrt[3]{1 - \delta T}} \frac{x_P}{\Delta_Z} \sqrt{\frac{V_{\text{ср}}}{6}}, \quad (3)$$

где  $k_Z$  — приведенный в [3] коэффициент, отражающий степень отклонения распределения погрешности  $\eta$  от нормального;  $V_{\text{ср}}$  — среднее число сигналов, ожидаемых в канале за интервал измерения занятости;  $\Delta_Z$  — предельно допустимая погрешность оценки;  $x_P$  — процентная точка интеграла вероятности  $\Phi(x)$ , соответствующая требуемой надежности  $P_Z$ , причем  $x_P$  можно определить по таблицам интеграла вероятности или в соответствии с рекомендациями, приведенными в [3].

Как правило, до начала измерений ни занятость канала, ни относительная нестабильность  $\delta T$  неизвестны. В подобных случаях имеет смысл перестраховаться и при расчете  $J_{\text{и}}$  ориентироваться на большие значения  $k_Z$  и  $\delta T$ . Тогда при  $k_Z = 1,2$  и  $\delta T \approx 0,5$  из (3) получаем

$$J_{\text{и}} = x_P \sqrt{V_{\text{ср}}} / (1,62 \Delta_Z). \quad (4)$$

Для надежности  $P_Z = 95\%$ , которой соответствует  $x_P \approx 2,0$ , и допускаемой погрешности  $\Delta_Z = 0,5\%$  из (4), в частности, следует

$$J_{\text{и}} \approx 250 \sqrt{V_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

**Методика оценивания нестабильности интервалов контроля.** Относительная нестабильность  $\delta T$  размещения точек контроля на оси времени, необходимая для адаптации объема измерений в соответствии с (3), на практике заранее неизвестна и, более того, по ходу работы может изменяться. Действительно, степень загруженности сервера радиоконтроля параллельными заданиями может быть непостоянной, а число ожидаемых сигналов и рекомендуемый интервал проверки состояния  $T_{\text{н}}$  для разных каналов могут быть различными. Как следствие, относительную нестабильность  $\delta T$  следует определять непосредственно по ходу конт-

роля занятости для каждого из тестируемых каналов в отдельности.

Отклонения реальных моментов контроля состояния  $t_j$  от «запланированного» набора точек  $\tilde{t}_j = jT_n$  имеют, как правило, равномерное распределение и дисперсию

$$D\{\Delta t\} = (\delta T T_n)^2 / 3. \quad (6)$$

Дисперсию моментов контроля, соответствующую текущей загрузке сервера, можно оценить по формуле

$$\tilde{D}\{\Delta t\} = \tilde{m}_2\{\Delta t\} - \tilde{m}_1^2\{\Delta t\},$$

$$\text{где } \tilde{m}_2\{\Delta t\} = \frac{1}{J_B} \sum_{j=1}^{J_B} (t_j - \tilde{t}_j)^2; \quad \tilde{m}_1\{\Delta t\} = \frac{1}{J_B} \sum_{j=1}^{J_B} (t_j - \tilde{t}_j); \quad (7)$$

$J_B$  — число точек контроля на участке измерения нестабильности.

Приравнявая наблюдаемую на практике оценку дисперсии (7) ее ожидаемому значению (6), при произвольном интервале  $T_n$  контроля состояния в конкретном канале получаем выражение для расчета

$$\delta T = \sqrt{3\tilde{D}\{\Delta t\} / T_n}.$$

Таким образом, для слежения за изменением нестабильности  $\delta T$  достаточно:

1. Организовать на сервере радиоконтроля кольцевой буфер для временного хранения  $J_B$  значений задержек исполнения команд на тестирование, организованный по принципу FIFO. Первоначально буфер заполняется нулями, а затем при каждом исполнении команды тестирования состояния произвольного канала (загруженность сервера для всех каналов общая) в этот буфер вместо старого  $\Delta t_j$  заносится новое значение

$$\Delta t_j = t_j - \tilde{t}_j,$$

где  $\tilde{t}_j, t_j$  — запланированный и истинный моменты проверки состояния канала.

2. При внесении изменений в буфер задержек одновременно корректируются (исходно равные нулю) суммы

$$S2_j = S2_{j-1} + \Delta t_j^2 - \underline{\Delta t}_j^2; \quad S1_j = S1_{j-1} + \Delta t_j - \underline{\Delta t}_j.$$

3. В итоге, для произвольного канала, который характеризуется интервалом контроля состояния  $T_n$ , текущую относительную нестабильность можно оценить как

$$\delta T_i = \frac{1}{T_n} \sqrt{3 \left( \frac{S2_j}{J_B} - \frac{S1_j^2}{J_B^2} \right)}. \quad (8)$$

Безусловно, до заполнения буфера реальными значениями задержек вместо первоначальных нулей правило (8) будет давать заниженную относительную нестабильность, однако этот этап имеет малую продолжительность, а потому возникающей погрешностью можно пренебречь.

Характеристики оценки занятости (2) применительно к разным значениям нестабильности  $\delta T$  при ее оценке с помощью (8) и последующем выборе объема тестирования состояния канала по правилу (3) приведены в табл. 1, 2 при требуемых погрешности  $\Delta_Z = 0,5\%$  и надежности 95%.

**Рекомендации по оценке занятости при отсутствии априорной информации о характеристиках тестируемых каналов.** Отметим, что даже максимально компактная формула (5) расчета числа необходимых точек тестирования состояния предполагает наличие информации об ожидаемом числе сигналов в канале за интервал измерения занятости. При продолжительном контроле занятости частотного спектра ожидаемое число сигналов может быть спрогнозировано в соответствии с методикой, приведенной в [3]. Если же измерение занятости проводится впервые, то при отсутствии априорных данных об интенсивности потока сигналов в канале рекомендуется ориентироваться на параметры тестирования из табл. 3, где приведены ожидаемые интенсивности сигналов в канале, при которой обеспечивается погрешность  $\Delta_Z = 0,5\%$  и надежность 95% при различной нестабильности  $\delta T$  интервалов контроля состояния канала.

Приведенные в табл. 3 значения получены в предположении наиболее проблемных значений занятости в тестируемом канале, требующих применения в (3) поправочного

Таблица 1

Реально наблюдаемая надежность  $P_Z$  оценивания занятости частот при нестабильности  $\delta T = 20\%$  распределения точек контроля вдоль оси времени

Средняя занятость канала Z, %	Минимальная и максимальная нормированные длительности сигналов в канале $\tau_{s \min} / T_n; \tau_{s \max} / T_n$						
	0,0005; 0,0015	0,0005; 0,0025	0,0005; 0,0055	0,0005; 0,0095	0,0005; 0,0195	0,002; 0,005	0,002; 0,010
2,5	0,975	0,965	0,968	0,969	0,972	0,974	0,976
5,0	0,979	0,972	0,969	0,968	0,966	0,974	0,973
10,0	0,968	0,967	0,965	0,965	0,962	0,968	0,966
20,0	0,961	0,964	0,964	0,963	0,962	0,963	0,961
30,0	0,963	0,963	0,963	0,963	0,961	0,962	0,962
40,0	0,965	0,964	0,964	0,963	0,963	0,963	0,963
50,0	0,962	0,964	0,963	0,964	0,964	0,964	0,965

Таблица 2

Реально наблюдаемая надежность  $P_Z$  оценивания занятости частот при нестабильности  $\delta T = 50\%$  распределения точек контроля вдоль оси времени

Средняя занятость канала Z, %	Минимальная и максимальная нормированные длительности сигналов в канале $\tau_{s \min} / T_n; \tau_{s \max} / T_n$						
	0,0005; 0,0015	0,0005; 0,0025	0,0005; 0,0055	0,0005; 0,0095	0,0005; 0,0195	0,002; 0,005	0,002; 0,010
2,5	0,956	0,963	0,964	0,965	0,966	0,975	0,973
5,0	0,971	0,969	0,968	0,965	0,966	0,973	0,969
10,0	0,967	0,964	0,961	0,961	0,960	0,966	0,964
20,0	0,963	0,960	0,961	0,958	0,959	0,960	0,959
30,0	0,962	0,962	0,962	0,960	0,959	0,962	0,961
40,0	0,963	0,962	0,962	0,959	0,963	0,963	0,962
50,0	0,961	0,962	0,962	0,962	0,962	0,964	0,962

Таблица 3

Параметры тестирования, рекомендуемые при отсутствии априорных данных о характеристиках исследуемых радиоканалов

Длительность интервала измерения занятости, мин	Максимальный рекомендуемый интервал контроля состояния каналов, с	Обеспечиваемое число точек проверки $J_{и}$	Интенсивность (сигналы в минуту) при нестабильности интервала контроля состояния канала	
			$\delta T \leq 0,1$	$\delta T \leq 0,4$
15,0	0,35	2570	10,7	8,16
5,0	0,20	1500	10,9	8,34

коэффициента  $k_z = 1,2$ . Отсюда следует, что даже при неравномерном распределении точек контроля вдоль оси времени с относительной нестабильностью  $\delta T \approx 40\%$  для тестирования радиоканалов, в которых в среднем наблюдается до 8 сигналов в минуту, для получения погрешности  $\pm 0,5\%$  и надежности 95% оценки занятости достаточно использовать лишь  $J_{и} \approx 2570$  точек контроля на интервале 15 мин и  $J_{и} \approx 1500$  точек контроля на интервале 5 мин. Для сравнения, в соответствии с [1, 2] для получения заметно большей погрешности  $\pm 10\%$  и надежности 95% по классической формуле (1) требуется от 1212 до 18166 точек контроля состояния радиоканалов. Таким образом, примерно в половине случаев (при занятости  $Z < 50\%$ ) рекомендуемая оценка (2) не только обеспечивает более высокую точность, но и характеризуется меньшей трудоемкостью, чем классическая оценка занятости, определяемая нормативными документами [1, 2].

Из изложенного можно сделать следующие выводы. Практика осуществления радиоконтроля показывает, что отдельные элементы рекомендаций [1, 2] по оценке занятости частот к настоящему моменту устарели и требуют корректировки. Для эффективного оценивания занятости необходимо проводить адаптацию параметров тестирования к текущим характеристикам проверяемых каналов, а также

принимать во внимание нестабильность  $\delta T$  распределения точек контроля состояния каналов вдоль оси времени, соответствующую загрузке сервера радиоконтроля. Предложенная методика контроля занятости частот позволяет получать точные и достоверные оценки занятости частот не только при целевом применении измерительной аппаратуры, но и при распределении ресурсов измерительных систем для параллельного решения многих задач радиоконтроля. Использование оценки занятости, базирующейся не на контроле числа случаев активности и пассивности канала, а на измерении суммарной продолжительности пребывания канала в активном и пассивном состояниях, как обеспечивает более высокую точность, так и приводит к меньшей трудоемкости по сравнению с требованиями нормативных документов [1, 2].

#### Литература

1. **Справочник** по радиоконтролю: МСЭ 2002. Женева, 2004.
2. **Рекомендация** МСЭ-R SM.182. Автоматический контроль занятости радиочастотного спектра.
3. **Козьмин В. А., Токарев А. Б.** Методика оценивания занятости частотного спектра автоматизированным сервером радиоконтроля // Измерительная техника. 2009. № 12. С. 37.
4. **Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А.** Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А. М. Рембовского. М.: Горячая линия — Телеком, 2006.
5. **Ашихмин А. В. и др.** Особенности построения и технические характеристики панорамных измерительных приемников семейства «АРГАМАК» // Специальная техника и связь. 2008. № 3. С. 50.

Дата принятия 08.10.2009 г.