

## Методика оценивания занятости частотного спектра автоматизированным сервером радиоконтроля

В. А. КОЗЬМИН, А. Б. ТОКАРЕВ

ЗАО «ИРКОС», Москва, Россия, e-mail: kv@ircos.vrn.ru

*Даны рекомендации по осуществлению контроля занятости радиочастотного спектра, основанные на ограничении максимально допускаемой абсолютной погрешности оценивания, благодаря чему обеспечиваются высокая точность и надежность результатов без избыточной загрузки сервера радиоконтроля.*

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

*The recommendations on realization of radiochannels occupancy estimation, based on restriction of the maximum permissible absolute estimation error, are given. One to this method the high accuracy and reliability without excess radiocontrol server loading, are ensured.*

**Key words:** radiofrequency spectrum, occupancy control.

Эффективное управление распределением радиочастотного спектра невозможно без детального контроля реального использования этого ресурса [1]. При определении занятости частот службы радиоконтроля руководствуются в настоящее время рекомендациями документов [1, 2], однако отдельные положения последних вступают в противоречие с практикой радиоконтроля и требуют корректировки. Настоящая работа посвящена разработке рекомендаций, позволяющих более эффективно контролировать занятость радиочастотного спектра при целевом использовании измерительной аппаратуры лишь для оценивания занятости. Применение современных быстродействующих систем радиомониторинга [3] для параллельного решения многих задач радиоконтроля будет рассмотрено в дальнейшем.

Занятость радиоканала (области частот) определяется долю времени, в течение которого в данном канале (области частот) действуют активные радиосигналы. Состояние канала считается активным (область частот — занятой), как правило, если уровень сигнала в этом канале превышает установленный порог обнаружения. Занятость частот изменяется во времени. Для слежения за ее изменением измерения циклически повторяют в течение суток, недели или еще большего отрезка времени. Продолжительность отдельного интервала измерения занятости  $T_i$  обычно выбирают равной 5 или 15 мин [1].

Пусть изменение уровня сигнала в канале соответствует представленному на рис. 1, где пунктиром показан установленный порог обнаружения. Занятость  $Z$  в подобном случае определяется выражением

$$Z = \frac{1}{T_i} \sum_{v=1}^V \tau_v.$$

На практике непрерывный во времени контроль состояния канала, как правило, невозможен. Вместо этого состояние канала на протяжении интервала измерений  $T_i$  проверяют периодически в конечном числе точек контроля  $J_i$ . При

фиксации на интервале измерений  $S_a$  случаев активности и  $S_0$  пассивного состояния канала оценку занятости находят по формуле

$$\tilde{Z} = S_a / (S_a + S_0). \quad (1)$$

В соответствии с [1, 2] мерой точности оценки занятости служит относительная погрешность измерений. Такой подход оказывается вполне целесообразным, когда необходимо корректно различать значения занятости, близкие к нулю, такие, например, как  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$ . Однако с позиции практических задач радиоконтроля случаи почти нулевой занятости оказываются реально эквивалентными. Измерения выполняются, в первую очередь, для отделения каналов с занятостью, близкой к 100 %, от слабо загруженных участков частот и каналов с практическими нулевой занятостью. Попытка же различить близкие к нулю значения  $Z$  с малой относительной погрешностью приводит лишь к явному завышению трудоемкости измерений.

С учетом сказанного при контроле занятости частот в качестве меры точности условимся использовать абсолютное значение погрешности  $\Delta Z_r = \tilde{Z} - Z$  измерения занятости в отдельном  $r$ -м опыте, а за основную метрологическую характеристику оценки (1) примем ее надежность  $P_Z$ , определяющую вероятность того, что оценка занятости  $\tilde{Z}$  будет

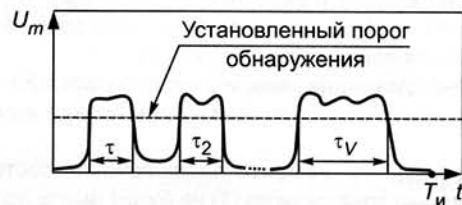


Рис. 1. Определение понятия «занятость радиоканала»

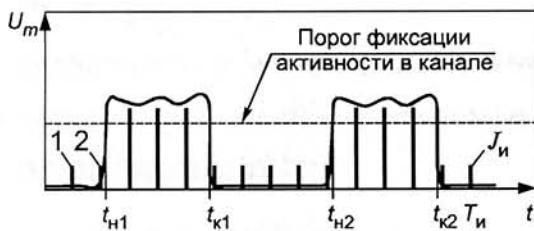


Рис. 2. Возникновение погрешности при оценке занятости частот



Рис. 3. Вычисление погрешности, вызываемой неточной фиксацией моментов смены состояния радиоканала

2) смещение момента смены состояния канала от точки  $t_{\text{u}j}$  порождает погрешность оценивания  $\delta Z_r = \Delta t / T_{\text{n}}$ ;

3) если смещение приводит к увеличению длительности активного состояния канала, то погрешность  $\delta Z_r$  положительна и может достигать  $0,5T_{\text{n}} / T_{\text{i}}$ ;

4) если смещение приводит к уменьшению активного состояния канала, то погрешность  $\delta Z_r$  оказывается отрицательной и также может достигать  $0,5T_{\text{n}} / T_{\text{i}}$ .

На практике число моментов смены состояния радиоканала от опыта к опыту может изменяться, их размещение на оси времени является случайным, а смещение  $\Delta t$  имеет равномерное распределение в интервале  $\pm 0,5T_{\text{n}}$ . Случайный вклад в погрешность оценки занятости, соответствующий  $i$ -му по порядку моменту смены состояния канала, обозначим  $\zeta_i$ . При длительностях сигналов, превышающих  $T_{\text{n}}$ , случайные величины  $\zeta_i$  (с различными  $i$ ) можно приближенно считать взаимно независимыми и подчиняющимися равномерному закону распределения с совпадающими параметрами

$$b = 1 / (2J_{\text{n}}), \quad a = -1 / (2J_{\text{n}}) = -b. \quad (2)$$

Соответственно, суммарная погрешность  $\eta_Z$  оценки занятости  $\tilde{Z}$  является случайной величиной, определяемой суммой случайных слагаемых  $\zeta_i$ :

$$\eta_Z = \sum_i \zeta_i. \quad (3)$$

С учетом взаимной независимости слагаемых  $\zeta_i$  характеристическую функцию величины  $\eta_Z$  можно представить в виде [4, с. 799]:

$$\Theta_{\eta}(v) = \prod_i \Theta_i(v) = \left( \frac{\sin bv}{bv} \right)^I,$$

где  $I$  — число переключений состояния канала на интервале  $T_{\text{n}}$ .

Таким образом, при  $I$  переключениях состояния канала на интервале измерений закон распределения погрешности оценки занятости радиоканала можно представить в виде

$$W_{\eta}(y | I) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\sin(bv)}{bv} \right)^I e^{-iyv} dv,$$

а вероятность попадания этой погрешности в интервал  $-\Delta_Z \leq \eta_Z \leq +\Delta_Z$  вычислить из соотношения [4, с. 800]:

$$P\{-\Delta_Z \leq \eta_Z \leq +\Delta_Z | I\} = \frac{\Delta_Z}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \Delta_Z v}{\Delta_Z v} \left( \frac{\sin bv}{bv} \right)^I dv, \quad (4)$$

где параметр  $b$  в соответствии с (2) определяется числом  $J_{\text{n}}$  точек контроля состояния канала.

Соотношение (4) определяет надежность оценки занятости частот при строго равноотстоящих точках контроля. Если же длительности интервалов  $T_{n_j}$  являются случайными, то в (4) вместо единой константы  $b$  должен входить набор независимых случайных параметров  $b_j = 0,5 s_j$ , где  $s_j = T_{n_j} / T_n$  — нормированный временной интервал между точками контроля. В результате надежность формально определяется выражением

$$P\{|\eta_Z| \leq \Delta_Z | I\} = \frac{\Delta_Z}{\pi} \times \\ \times \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \Delta_Z v}{\Delta_Z v} \vartheta_1(v, x_1) \times \dots \times \vartheta_I(v, x_I) dv dx_1 \dots dx_I, \quad (5)$$

—  
I-кратный

где  $\vartheta_j(v, x_j) = \frac{\sin(x_j v / 2)}{x_j v / 2} \frac{x_j}{M s_j} W_{s_j}(x_j)$  — функция, учитывающая конкретные  $W_{s_j}(x_j)$  плотности вероятности распределения нормированных интервалов  $s_j$ , а также тот факт, что возможность попадания момента переключения состояния канала на интервал  $T_{n_j}$  прямо пропорциональна протяженности этого интервала.

Отметим, что практическая ценность приведенных выше выражений для расчета надежности оценки занятости оказывается весьма невысокой из-за их значительной вычислительной сложности. Вместе с тем, поскольку погрешность  $\eta_Z$  оценки занятости  $\tilde{Z}$  определяется суммой (3) случайных величин, то вместо строгих выражений (4), (5) можно попытаться воспользоваться сопровождающим суммирование эффектом нормализации. Учитывая, что при фиксированном интервале  $T_n$  между точками контроля среднее квадратическое отклонение слагаемых  $\zeta_i$  составляет

$$\sigma_i = b / \sqrt{3} = 0,5 T_n / (\sqrt{3} T_n),$$

и полагая, что на интервале измерения занятости наблюдается  $I$  переключений состояния канала, для итоговой погрешности  $\eta_Z$  имеем  $M_{\eta} = 0$  и

$$\sigma_{\eta} = \frac{1}{2J_n} \sqrt{\frac{I}{3}}. \quad (6)$$

Как следствие, надежность оценки (1) определяется выражением

$$P_Z \approx \Phi(\Delta_Z / \sigma_{\eta}) = 2(F_{ct}(\Delta_Z / \sigma_{\eta}) - 0,5), \quad (7)$$

где  $F_{ct}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz$  — функция распределения стандартной нормальной случайной величины.

Исследования показывают, что погрешность, возникающая при использовании (7), для задач радиоконтроля оказывается вполне приемлемой, а для вычисления значений  $F_{ct}(x)$  можно рекомендовать аппроксимацию (26.2.18) из [5, с. 729]:

$$F_{ct}(x) \approx 1 - 0,5 (1 + x(0,196854 + x(0,115194 + \\ + x(0,000344 + x(0,019527))))^{-4}.$$

Из соотношений (6), (7), связывающих между собой число точек контроля  $J_n$ , допускаемую погрешность  $\Delta_Z$  и надежность  $P_Z$  оценки занятости, находим

$$J_n = \frac{x_P}{2P_Z} \sqrt{\frac{I}{3}}, \quad (8)$$

где  $x_P$  — процентная точка интеграла вероятности  $\Phi(x)$ , соответствующая требуемой надежности  $P_Z$ .

Для расчета  $x_P$  применительно к значениям надежности из диапазона  $0,9 \leq P_Z \leq 0,999$  можно на основании (26.2.22) из [5, с. 729] рекомендовать аппроксимацию

$$x_P = y - \frac{2,30753 + y,27061}{1 + y(0,99229 + y,04481)}, \quad (9)$$

где

$$y = \sqrt{2 \ln [2 / (1 - P_Z)]}. \quad (10)$$

Выражения (8) — (10) могут служить основой для выбора параметров контроля состояния тестируемых радиоканалов.

Практическое использование соотношения (10) осложняется тем, что число  $I$  переключений состояния канала на очередном интервале измерений заранее неизвестно. Его можно лишь попытаться предсказать на основе анализа характеристик канала.

Последовательность моментов активации канала является, как правило, пуссоновским потоком событий с некоторой интенсивностью  $\lambda_A$ , определяемой средним числом сигналов, наблюдаемых в этом канале в единицу времени. До проведения измерений интенсивность подобного потока может быть неизвестной, однако при длительностях наблюдаемых сигналов и пауз между ними, превышающих интервал контроля  $T_n$ , ее можно достаточно точно оценить. Действительно, оценкой максимального правдоподобия для параметра распределения Пуассона служит среднее арифметическое наблюдаемых значений, а адаптацию априорной величины  $\lambda_A$  к текущим свойствам проверяемого канала можно осуществлять путем низкочастотной фильтрации реально наблюдаемых значений. Для подобной фильтрации, в частности, можно рекомендовать правило

$$\lambda_{A(r+1)} = (w\lambda_{A_r} + v_r) / (w + 1), \quad (11)$$

где  $v_r$  — число сигналов, наблюдавшихся в канале на очередном  $r$ -м шаге адаптации;  $w$  — параметр, характеризующий вес старого (накопленного) значения интенсивности потока и определяющий инерционность процедуры адаптации, причем для каналов с явно нестабильной занятостью  $w$  рекомендуется выбирать из диапазона  $1 \leq w < 10$ ; для стационарных по свойствам радиоканалов можно использовать значения коэффициента  $10 \leq w < 50$ .

Оценивание интенсивности потока сигналов в канале в соответствии с (11) позволяет контролировать занятость каналов, характеристики которых заранее неизвестны, но лишь в условиях значительной длительности наблюдаемых в канале сигналов.

Таблица 1

Поправочные коэффициенты  $k_z$  для расчета рекомендуемого числа точек контроля состояния в каналах с малой занятостью

Оценка занятости канала $\tilde{Z}(k)$	Поправочный коэффициент $k_z$ при средней длительности $\tau_s$ сигналов в канале	
	$\tau_s \leq 0,0025T_n$	$\tau_s > 0,0025T_n$
$\tilde{Z}(k) \leq 4\Delta_Z$	1,20	1,17
$4\Delta_Z < \tilde{Z}(k) \leq 8\Delta_Z$	1,17	1,15
$8\Delta_Z < \tilde{Z}(k) \leq 12\Delta_Z$	1,14	1,11
$12\Delta_Z < \tilde{Z}(k) \leq 18\Delta_Z$	1,11	1,08
$18\Delta_Z < \tilde{Z}(k) \leq 24\Delta_Z$	1,05	1,05
$\tilde{Z}(k) > 24\Delta_Z$	1,03	1,03

Таблица 2

Поправочные коэффициенты  $k_z$  для расчета рекомендуемого числа точек контроля состояния в каналах с большой занятостью

Оценка занятости канала $\tilde{Z}(k)$	Поправочный коэффициент $k_z$ при средней длительности $\tau_p$ пауз	
	$\tau_p \leq 0,0025T_n$	$\tau_p > 0,0025T_n$
$\tilde{Z}(k) \geq (1,0 - 4\Delta_Z)$	1,20	1,17
$(1,0 - 8\Delta_Z) \leq \tilde{Z}(k) < (1,0 - 4\Delta_Z)$	1,17	1,15
$(1,0 - 12\Delta_Z) \leq \tilde{Z}(k) < (1,0 - 8\Delta_Z)$	1,14	1,11
$(1,0 - 18\Delta_Z) \leq \tilde{Z}(k) < (1,0 - 12\Delta_Z)$	1,11	1,08
$(1,0 - 24\Delta_Z) \leq \tilde{Z}(k) < (1,0 - 18\Delta_Z)$	1,05	1,05
$\tilde{Z}(k) < (1,0 - 24\Delta_Z)$	1,03	1,03

Если до начала измерений занятость в канале неизвестна, то, ориентируясь на наиболее проблемные случаи

$\tilde{Z}(k) \leq 4\Delta_Z$  или  $\tilde{Z}(k) \geq (1,0 - 4\Delta_Z)$ , можно рекомендовать в подобных ситуациях использовать в (13) значение поправочного коэффициента  $k_z = 1,2$ , что приводит к правилу расчета

$$J_n \approx 0,5 x_P \sqrt{V_{cp}} / \Delta_Z.$$

Таким образом, при осуществлении контроля занятости частот рекомендуется:

для каждого ранее тестировавшегося канала сохранять сведения о среднем числе сигналов  $\lambda_A$ , наблюдавшихся в этом канале в единицу времени;

выбирать число точек контроля состояния канала, соответствующее ожидаемому числу переключений состояния, по формуле (13);

параллельно с накоплением сведений, необходимых для расчета занятости, фиксировать общее число сигналов  $V_r$ , наблюдавшихся на текущем интервале измерения занятос-

При анализе занятости каналов, сигналы в которых характеризуются малой длительностью, появляется вероятность пропуска части подобных сигналов, однако к существенным погрешностям оценки занятости это не приводит. Действительно, пусть все сигналы в канале имеют практическую равную длительность  $\tau_s < T_n$ . При этом вероятность фиксации активного состояния

$$\tilde{P}_a = \tau_s / T_n,$$

и вместо истинного числа сигналов  $V$ , присутствующих на интервале  $T_n$ , при расчете занятости будут учтены в среднем лишь  $\tilde{V} = V\tilde{P}_a$  сигналов. В результате при истинном значении занятости канала  $Z = V\tau_s / T_n$ , оценка занятости (1) будет в среднем давать такое же значение

$$m_1(\tilde{Z}) = \tilde{V}T_n / T_n = V\tilde{P}_a T_n / T_n = V\tau_s / T_n.$$

Итак, хотя на интервале измерения фиксируются не все присутствующие сигналы, зафиксированным сигналам «присваивается» длительность, превышающая истинную. В результате оценка занятости по (1) оказывается несмещенной.

Отметим однако, что при  $\tau_s < T_n$  погрешность оценки числа наблюдаемых сигналов будет приводить к неточности определения интенсивности потока сигналов в канале  $\lambda_A$ , для корректировки которой при использовании (11) зафиксированное число сигналов необходимо увеличивать в  $T_n / \tau_s$  раз. Аналогичная неточность оценки интенсивности потока сигналов  $\lambda_A$  возникает при малой продолжительности пауз  $\tau_p$  между состояниями активности в канале.

Оценку среднего числа сигналов, действующих в каналах в единицу времени, следует вычислять по формуле

$$\lambda_{A(r+1)} = \begin{cases} \frac{1}{(w+1)}(w\lambda_{Ar} + v_r) & \text{при } T_n \leq \min(\tau_s, \tau_p); \\ \frac{1}{(w+1)}\left(w\lambda_{Ar} + \frac{v_r T_n}{\min(\tau_s, \tau_p)}\right) & \text{при } T_n > \min(\tau_s, \tau_p). \end{cases} \quad (12)$$

Рассмотренные выше погрешности, а также отклонение характеристик погрешности оценки занятости от строго нормального распределения требуют несколько увеличивать используемое на практике число точек контроля состояния  $J_n$  по сравнению с (8). Статистические исследования показывают, что необходимый для учета упомянутых эффектов поправочный коэффициент зависит от занятости канала и увеличивается при наличии на интервале измерения  $T_n$  небольшого числа коротких сигналов (при этом занятость составляет единицы процентов) или лишь нескольких коротких пауз между интервалами активности каналов (при занятости, близкой к 100 %).

Можно предложить несколько вариантов расчета увеличенного числа точек контроля  $J_n$ , однако проще всего воспользоваться формулой

$$J_n = k_z (\tilde{Z}) \frac{x_P}{\Delta_Z} \sqrt{\frac{V_{cp}}{6}}, \quad (13)$$

где  $V_{cp} = \lambda_{A(r+1)} T_n$  — среднее число сигналов, ожидаемых в канале за интервал измерения занятости;  $k_z$  — поправочный коэффициент, отражающий степень отклонения распределения погрешности  $\eta_z$  от нормального и определяемый для разных значений предельно допускаемой погрешности оценки занятости  $\Delta_Z$  (табл. 1, 2).

Таблица 3

**Реально наблюдаемая надежность  $P_z$  оценивания занятости частот при равномерном распределении точек контроля вдоль оси времени и требуемых погрешности  $\Delta_z = 0,5\%$  и надежности 95 %**

Средняя занятость канала $Z$ , %	Надежность $P_z$ при минимальной и максимальной нормированных длительностях сигналов в канале $\tau_{s \min} / T_i$ ; $\tau_{s \max} / T_i$						
	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	0,981	0,961	0,962	0,964	0,967	0,972	0,972
5,0	0,973	0,969	0,962	0,962	0,962	0,969	0,966
10,0	0,961	0,963	0,957	0,957	0,957	0,962	0,960
20,0	0,954	0,956	0,958	0,956	0,951	0,958	0,955
30,0	0,958	0,953	0,960	0,958	0,955	0,956	0,956
40,0	0,956	0,954	0,960	0,955	0,956	0,956	0,958
50,0	0,953	0,956	0,956	0,956	0,956	0,958	0,958

ти. По завершении очередного интервала измерений корректировать интенсивность потока сигналов в текущем канале  $\lambda_A$  в соответствии с (12).

Проверку свойств изложенной выше методики измерения занятости радиочастот целесообразно осуществлять методом статистического моделирования. Серии измерений занятости в широком диапазоне параметров позволяют получить данные, аналогичные представленным в табл. 3.

**Заключение.** Практика осуществления радиоконтроля показывает, что отдельные положения рекомендаций [1, 2] по оценке занятости частот к настоящему моменту устарели и требуют корректировки. Для такой оценки следует ис-

пользовать абсолютную, а не относительную погрешность измерения занятости. Для повышения эффективности работы сервера радиоконтроля необходимо адаптировать параметры тестирования к текущим характеристикам проверяемых каналов.

В статье предложена методика контроля занятости частот, ориентированная на целевое применение измерительной аппаратуры для сбора данных о состоянии каналов и на равномерное распределение точек контроля вдоль оси времени. Методика характеризуется малой трудоемкостью и позволяет обеспечивать надежность оценивания занятости не хуже минимально допустимой при затратах времени на выполнение измерений, существенно меньших требуемых в соответствии с рекомендациями [1, 2].

#### Литература

1. Справочник по радиоконтролю: МСЭ 2002. — Женева, 2004.
2. Рекомендация МСЭ-R SM.182. Автоматический контроль занятости радиочастотного спектра.
3. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А. М. Рембовского. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006.
4. Бронштейн И. Н., Семенджиев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — М.: Наука, 1980.
5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. — М.: Наука, 1979.

Дата принятия 08.10.2009 г.