

УДК 621.396.99

## ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ЗАНЯТОСТИ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА

**В.А. Козьмин**, директор по научной работе ЗАО «ИРКОС», к.т.н., доцент; kv@ircoc.vrn.ru

**А.П. Павлюк**, консультант ЗАО «ИРКОС», к.т.н., с.н.с.; alexander.pavlyuk@ties.itu.int

**А.Б. Токарев**, начальник НИС ЗАО «ИРКОС», к.т.н., доцент; TokarevAB@ircoc.vrn.ru

Обсуждаются проблемы, возникающие при измерениях занятости радиочастотного спектра в традиционных условиях, когда требования к точности оценок устанавливаются в форме ограничений предельно допустимой относительной или абсолютной погрешности. Показано, что для достижения разумного компромисса между аппаратными затратами и качеством получаемых оценок следует предъявлять к погрешности «плавающие» требования, предполагающие с ростом занятости ужесточение относительной погрешности и при этом допускающие незначительное возрастание абсолютной погрешности оценивания. Отсутствие априорных сведений о занятости в анализируемых каналах при выборе режима работы аппаратуры следует ориентироваться на получение минимум 600 выборок за интервал накопления данных для каналов, где наблюдаются протяженные сигналы, и не менее 1800 выборок для радиоканалов с импульсными сигналами.

**Ключевые слова:** радиочастотный спектр, оценка занятости, погрешность измерений

**Введение.** Измерение занятости радиочастотного спектра необходимо для эффективного управления этим ресурсом и должно осуществляться с заданной точностью и достоверностью [1]. В документах [2–4] приведены рекомендации по обеспечению требуемого качества измерений, однако Справочник по контролю за использованием спектра МСЭ [2] и Рекомендация МСЭ-R [3] предполагают ограничение допустимой относительной погрешности измерений, а Отчет МСЭ-R [4] базируется на ограничении абсолютной погрешности. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. В публикуемой ниже статье даются рекомендации по выбору требований к точности оценивания занятости спектра, объединяющие преимущества этих двух подходов.

**Анализ требований к оценкам занятости спектра.** Изучение документов [1–4] показывает, что точность и достоверность оценок занятости канала  $SO$  зависит от количества выборок данных  $J_m$ , получаемых от аппаратуры контроля за время накопления данных  $T_f$ , составляющее обычно 5 или 15 мин, от степени занятости анализируемых радиоканалов и от характера действующих в них сигналов.

Проанализируем вначале случай оценки занятости в канале, где действуют импульсные сигналы, имеющие длительность менее тысячной доли от  $T_f$ . Воспользуемся приведенным в [5] выражением

$$J_m = SO(1 - SO)(x_p / \Delta_{SO})^2, \quad (1)$$

где  $J_m$  — число выборок данных;  $SO$  — занятость канала;  $x_p$  — процентная точка интеграла вероятности, соответствующая уровню достоверности  $P_{SO}$ ;  $\Delta_{SO}$  — абсолютная погрешность измерений.

Тогда для подобных сигналов соотношение между  $J_m$  и обеспечиваемой  $\Delta_{SO}$  можно записать в виде

$$\Delta_{SO} = x_p \sqrt{SO(1 - SO) / J_m}. \quad (2)$$

На рис. 1 показаны зависимости относительной  $\delta_{SO} = \Delta_{SO} / SO$  (сплошные линии) и абсолютной  $\Delta_{SO}$  (пунктирные линии) погрешностей оценок занятости для импульсных сигналов от  $J_m$  при разных значениях  $SO$  и 95%-ном уровне достоверности, построенные на основе (2). Квадратичный по  $SO$  характер подкоренного выражения в (2) указывает, что при фиксированном  $J_m$  для произвольной пары значений занятости  $SO^*$  и  $(1 - SO^*)$  абсолютная погрешность измерений оказывается одинаковой, что является причиной двужначности функции  $\Delta_{SO}(J_m)$ . Наибольшее отклонение вправо линий фиксированной абсолютной погрешности наблюдается при  $SO = 50\%$ , указывая на то, что именно при такой занятости для проведения точных и достоверных измерений требуется наибольшее количество  $J_m$ .

Рис. 1 позволяет наглядно продемонстрировать существенные отличия в характере изменений  $\delta_{SO}(J_m)$  и  $\Delta_{SO}(J_m)$ . Те же отличия в несколько иной форме демонстрирует и табл. 1, где представлены значения  $J_m$ , необходимые при разной занятости каналов для достижения не более чем 10%-ной относительной погрешности, либо 0,5%-ной абсолютной погрешности при 95%-ном уровне достоверности. Из табл. 1 видно, что фиксация требований лишь к  $\delta_{SO}$ , либо к  $\Delta_{SO}$  приводит к резкому увеличению необходимого числа выборок данных для каналов с высокой занятостью, или для слабо занятых каналов. Анализ этих данных и рекомендаций, содержащихся в документах [2–4], позволяет установить следующее.

Ограничение допустимой относительной погрешности измерений значением 10%, предлагаемое Справочником по радиоконтролю [2] и Рекомендацией [3], означает, что при реальной занятости каналов, превышающей 90%, допустимой оказывается погрешность  $\Delta_{SO} = \pm 9\%$ . Это позволяет при сборе данных обойтись всего несколькими сотнями выборок, однако соответствует недостаточно точному оце-

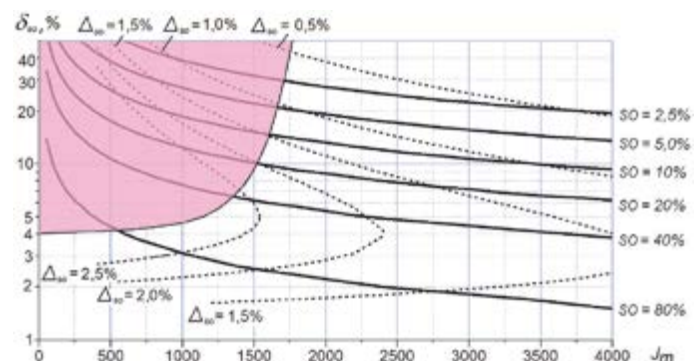


Рис. 1. Зависимость  $\delta_{SO}$  и  $\Delta_{SO}$  от  $J_m$  при разных значениях занятости и 95%-ном уровне достоверности

Таблица 1

Занятость, %	Относительная погрешность 10 %		Абсолютная погрешность 0,5 %	
	Результирующая величина абсолютной погрешности, %	Число необходимых независимых выборок	Результирующая величина относительной погрешности, %	Число необходимых независимых выборок
1	0,1	38047	50	1522
2	0,2	18832	25	3013
3	0,3	12426	16,7	4473
4	0,4	9224	12,5	5903
5	0,5	7302	10	7302
10	1,0	3461	5	13835
15	1,5	2178	3,3	19600
20	2,0	1537	2,5	24596
30	3,0	897	1,7	32283
40	4,0	576	1,25	36894
50	5,0	384	1,0	38432
60	6,0	256	0,83	36894
70	7,0	165	0,71	32283
80	8,0	96	0,62	24596
90	9,0	43	0,56	13835

ниванию с позиции  $\Delta_{SO}$ . Для каналов с занятостью менее 5% такой подход, напротив, ведет к требованию  $|\Delta_{SO}| < 0,5\%$ , что возможно лишь при накоплении более  $10^4$  выборок данных, т.е. требует значительных затрат аппаратных ресурсов.

Рекомендуемое в Отчете [4] ограничение  $\Delta_{SO}$  значением 0,5% для слабо занятых каналов оказывается рациональным. Хотя в каналах с  $SO$  менее 5% при этом может наблюдаться значительная относительная погрешность, тот факт, что реальные отклонения не выходят за рамки  $\pm 0,5\%$ , свидетельствует о достаточной точности измерений. Так, для  $SO = 1\%$  границы доверительного интервала оценивания в 0,5 и 1,5% все равно характеризуют весьма малую занятость, и вряд ли целесообразно тратить время на получение большого числа дополнительных выборок данных для подтверждения этого очевидного факта с ещё большей точностью, выражаемой в десятых долях процента. Вместе с тем, для каналов с  $SO$ , превышающей 10%, допустимая абсолютная погрешность  $\pm 0,5\%$  устанавливает излишне жёсткие требования к погрешности оценивания и затрачиваемым ресурсам.

**Рекомендации по изменению требований к точности оценки занятости.** Оценивая приведенные выше данные, и основываясь на практическом опыте работы служб радиоконтроля, можно сформулировать следующие рекомендации.

1. Для радиоканалов, характеризуемых  $SO$ , не превышающей 5%, целесообразно устанавливать требования  $\Delta_{SO} = 0,5...1\%$ , что гарантирует достаточную для радиоконтроля точность оценивания при приемлемых затратах аппаратных ресурсов.

2. Для каналов с  $SO$  более 10% далекими от идеала оказываются оба рассмотренные выше варианта ограничений, так как в каналах с высокой  $SO$  при фиксации  $\delta_{SO}$  оценки получаются довольно грубыми, а обеспечение малых значений  $\Delta_{SO}$  требует чрезмерных аппаратных затрат.

Таким образом, наиболее рациональным оказывается промежуточный вариант, при котором с ростом занятости

спектра требования к  $\delta_{SO}$  ужесточаются, и при этом допускается незначительное возрастание  $\Delta_{SO}$ . Примерами подобных эффективных компромиссных требований могут служить следующие два правила, определяющие допустимую абсолютную погрешность оценок занятости:

$$\Delta_{SO} = 0,005 + 0,05SO \quad (3)$$

и «выпуклое»

$$\Delta_{SO} = 0,0016 + 0,02\sqrt{SO(1,86 - SO)}. \quad (4)$$

Соответствующие этим правилам допустимые значения  $\Delta_{SO}$ ,  $\delta_{SO}$  и соответствующие им количества необходимых  $J_m$  приведены в табл. 2. Её анализ показывает следующее:

- хотя правила (3) — (4) в слабо занятых каналах допускают относительную погрешность, превышающую требования Рекомендации [3], эти погрешности по абсолютной величине весьма невелики и для каналов с занятостью менее 5% составляют не более  $\pm 0,7\%$ . Отказ от излишне жёстких требований к точности оценивания, характерных для Рекомендации [3], позволяет при этом сократить по отношению к ней необходимое количество выборок по меньшей мере в 3 раза;

- для каналов с занятостью более 50% правило (3) и, особенно, правило (4) приводят к необходимости существенно увеличивать  $J_m$  по отношению к требованиям Рекомендации МСЭ-R [3]. Однако по абсолютной величине это количество не превышает 85% от максимально необходимого (см. табл. 2 для каналов с занятостью 15...20%) для правила (4) и 30% от максимально необходимого для правила (3). При этом точность оценивания по отношению к Рекомендации МСЭ-R [3] увеличивается на 60...80% для правила (3) и в 2,7...4,5 раза для правила (4).

Отметим, что «выпуклое» правило расчета допустимой абсолютной погрешности оценивания не только обеспечивает по отношению к линейному заметный выигрыш в точности, но и одновременно стабилизирует требования

Таблица 2

Занятость, %	Линейное правило (3)			«Выпуклое» правило (4)		
	Требуемая абсолютная погрешность, %	Требуемая относительная погрешность, %	Количество необходимых выборок	Требуемая абсолютная погрешность, %	Требуемая относительная погрешность, %	Количество необходимых выборок
1	0,55	55,0	1258	0,43	43,2	2038
2	0,60	30,0	2092	0,54	27,2	2548
3	0,65	21,7	2647	0,63	21,0	2830
4	0,70	17,5	3012	0,70	17,5	3015
5	0,75	15,0	3245	0,76	15,2	3147
<b>10</b>	<b>1,00</b>	<b>10,0</b>	<b>3461</b>	<b>1,00</b>	<b>10,0</b>	<b>3461</b>
15	1,25	8,3	3136	1,17	7,8	3562
20	1,50	7,5	2733	1,31	6,6	3570
30	2,00	6,7	2018	1,53	5,1	3456
40	2,50	6,3	1476	1,69	4,2	3236
50	3,00	6,0	1068	1,81	3,6	2935
60	3,50	5,8	753	1,90	3,2	2558
70	4,00	5,7	504	1,96	2,8	2096
80	4,50	5,6	304	2,00	2,5	1535
90	5,00	5,6	138	2,02	2,2	848

к количеству выборок, используемых при расчете оценок занятости. Данный факт, а также удобство использования на практике фиксированного количества выборок при сборе данных делает целесообразным анализ вариаций погрешностей при условии  $J_m = \text{const}$ .

Результаты подобного исследования для импульсных сигналов и случаев  $J_m = 3600$  и  $J_m = 1800$  выборок представлены сплошными линиями на рис. 2, который показывает зависимость от  $J_m = 1800$  абсолютной погрешности оценок занятости спектра  $\Delta_{SO}$ , характеризующихся достоверностью 95%. Из рисунка видно, что оценки занятости, рассчитываемые по 3600 выборкам, обладают высокими точностными показателями, а также что даже при способности аппаратуры контроля обрабатывать лишь 1800 выборок за интервал накопления данных  $T_I$  точность получаемых оценок занятости оказывается достаточной для целей радиоконтроля:

- для радиоканалов с занятостью от 25 до 75 %, приходящейся лишь на импульсные сигналы, реальная  $SO$  может отличаться от оценок, получаемых по 1800 выборкам данных, примерно на  $\pm 2\%$ , что соответствует относительной погрешности не более 8%;

- при  $SO < 18\%$  относительная погрешность оценок занятости становится больше значения в 10%, предлагаемого Рекомендацией [3], однако по абсолютной величине она не слишком велика и составляет не более  $\pm 1,5\%$  для каналов с  $SO \leq 12\%$  и не более  $\pm 1,0\%$  для каналов с  $SO > 5\%$ .

Следует признать, что хотя для каналов с  $SO \geq 10\%$  точность оценок, получаемых по 1800 выборкам, оказывается вполне удовлетворительной для целей радиоконтроля, применительно к каналам с  $SO = 5...10\%$  обеспечиваемая при  $J_m = 1800$  точность измерений оказывается, пожалуй, минимально допустимой. Таким образом, для сбора сведений о занятости каналов с импульсными сигналами следует применять аппаратуру, обеспечивающую как минимум 1800 проверок состояния каналов за интервал накопления данных, т.е. минимум две выборки в секунду при  $T_I = 15$  мин и 6 выборок в секунду при  $T_I = 5$  мин.

Помимо сведений, относящихся к импульсным сигналам, на рис. 2 пунктирными и штрихпунктирными линиями приведены данные, характеризующие точность измерений занятости в каналах с протяженными сигналами (длительность  $\tau_s$ , которых заметно превышает  $0,001T_I$ ). Эти данные получены в соответствии с приведенной в [6] методикой, указывающей, что при эквидистантном по времени тестировании состояния радиоканала погрешность  $\Delta_{SO}$  связана с количеством выборок соотношением

$$\Delta_Z = \frac{x_p}{2J_m} \sqrt{1,06 V_{avr}}, \tag{5}$$

где  $V_{avr}$  – среднее число протяженных сигналов, наблюдаемых в канале за интервал накопления данных. Различие между двумя группами кривых, приведенных на рис. 2 для протяженных сигналов, объясняется отличием причин, вызывающих изменение занятости.

Показанные на рис. 2 пунктиром горизонтали соответствуют случаю, когда изменение занятости происходит за

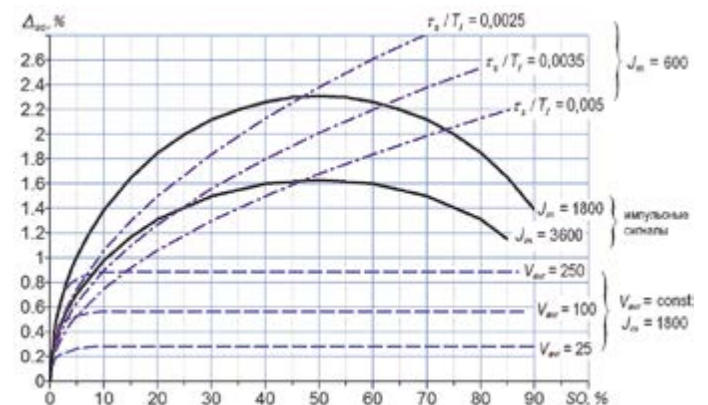


Рис. 2. Зависимость  $\Delta_{SO}$  от  $SO$  при фиксированном числе выборок данных  $J_m$  и достоверности 95%

счет изменения длительности сигналов при фиксированном их среднем количестве. К примеру, для линии  $V_{avr} = 100$ , соответствующей наблюдению в канале 100 сигналов за время накопления данных,  $SO = 50\%$  обеспечивается при  $\tau_s / T_I = 0,005$  и аналогичной протяженности пауз между сигналами, а  $SO = 25\%$  — при сокращении продолжительности сигналов до  $\tau_s / T_I = 0,0025$  и увеличении длительности пауз до  $\tau_p / T_I = 0,0075$ .

Если же изменение занятости вызывается изменением среднего числа сигналов, наблюдаемых на интервале накопления данных, при неизменной их длительности, то характер изменения погрешности оказывается иным. Пусть длительности сигналов на интервале накопления данных одинаковы  $\tau_s / T_I = 0,0025$  и занятость в 50% обеспечивается при  $V_{avr} = 50\% / (\tau_s / T_I) = 200$ , а занятость в 25% получается при  $V_{avr} = 25\% / (\tau_s / T_I) = 100$ . Соответствующие кривые для  $J_m = 600$  показаны на рис. 2 набором штрихпунктирных линий.

Из рис. 2 видно, что даже для сравнительно коротких сигналов, удовлетворяющих соотношению  $\tau_s / T_I = 0,0025$ , уже при  $J_m = 600$  погрешность оценивания при занятости  $SO < 50\%$  оказывается ниже погрешности оценок занятости импульсных сигналов для  $J_m = 1800$ . И лишь для  $SO > 75\%$  абсолютная погрешность оценивания при  $J_m = 600$  оказывается большой — превышает 3%, хотя и в этом случае относительная погрешность оценивания остаётся ниже, чем требуемая согласно Рекомендации [3]. Это доказывает, что для измерения занятости в каналах с протяженными сигналами допустимо применять аппаратуру, обеспечивающую 600 выборку состояния каналов за время накопления данных.

**Заключение.** Модификация требований к точности оценивания занятости, определяемая правилами (3) и (4), задаёт приемлемую для практики радиоконтроля допустимую погрешность оценок занятости применительно ко всему диапазону её возможных значений и позволяет осуществ-

лять измерения при аппаратных затратах, соответствующих возможностям современной аппаратуры контроля. Если аппаратура контроля не позволяет проводить гибкую настройку количества накапливаемых выборок для разных радиоканалов, то при выборе режима её работы допустимо ориентироваться на получение как минимум 600 выборок за  $T$  для каналов, где наблюдаются протяженные сигналы, и не менее 1800 выборок за  $T$  для прочих каналов.

Указанные темпы сбора данных гарантируют приемлемые точность и достоверность измерения  $SO$  даже для радиоканалов, где действуют импульсные сигналы, а для каналов, где наблюдается не более 250 протяженных сигналов за время накопления данных расчет оценок занятости по 1800 выборкам обеспечивает абсолютную погрешность оценивания менее 1% при уровне достоверности 95%.

Результаты проведенного анализа могут стать предметом предложений по уточнению ряда положений Рекомендации МСЭ-R [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под редакцией А. М. Рембовского. — 3-е изд., перераб. и доп. — М: Горячая линия-Телеком, 2012. — 640 с.
2. Справочник по контролю за использование спектра МСЭ. — Женева, 2011. — 659 с.
3. Рекомендация МСЭ-R SM.1880. Измерение занятости спектра — Женева, 2011. — 8 с.
4. Отчет МСЭ-R SM.2256. Измерение и оценка занятости спектра — Женева, 2012. — 52 с.
5. Токарев А. Б. Требования к быстродействию аппаратуры измерения занятости радиочастотного спектра в каналах с импульсными сигналами // Радиотехника. — 2012. — № 2. — С. 45–48.
6. Токарев А. Б. Особенности оценки занятости радиоканалов с протяженными сигналами при тактируемых и нетактируемых измерениях // Радиотехника. — 2012. — № 8. — С. 107–111.

Получено 25. 12.13

## ИНФОРМАЦИЯ

### «РОСТЕЛЕКОМ» РЕАЛИЗОВАЛ ПРОЕКТ «БЕЗОПАСНЫЙ ГОРОД» В НИЖНЕМ ТАГИЛЕ

**«Ростелеком» завершил работы по настройке системы видеонаблюдения и фиксации нарушений правил дорожного движения в Нижнем Тагиле.**

Как показывает зарубежный опыт, применение системы «Безопасный город» для поддержания общественного порядка может быть весьма эффективным. В частности, благодаря запуску аналогичных проектов в Осло и Стокгольме количество преступлений, совершенных на улицах и в местах массового скопления людей, уменьшилось на 25–30%. Количество нарушений правил дорожного движения снизилось в 3 раза, смертность в ДТП — в 1,5 раза, а раскрываемость уличных преступлений выросла на 27%.

Аппаратно-программный комплекс, разработанный «Ростелекомом», помогает правоохранителям круглосуточно контролировать ситуацию на улицах и дорогах российских городов.

«Ростелеком» был выбран поставщиком услуг по программе «Безопасный город» в 2013 г. по результатам открытого аукциона, проведенного Муниципальным казенным учреждением

«Служба заказчика городского хозяйства» города Нижний Тагил. По условиям контракта была разработана проектно-сметная документация и выполнены работы по строительству комплекса «Безопасный город». В июне текущего года компания завершила настройку оборудования видеонаблюдения и готова перейти в режим технического сопровождения.

Комплекс «Безопасный город» в Нижнем Тагиле включает в себя более 70 стационарных, поворотных и панорамных камер видеонаблюдения, установленных на улицах, в детских садах и школах. Для фиксации нарушений правил дорожного движения служит система автоматической фотовидеофиксации, которая включает 20 перекрестков. На каждом из них установлены камеры, работающие в круглосуточном режиме.

Комплекс «Безопасный город» фиксирует различные нарушения и обеспечивает возможность автоматизированной сортировки и поиска информации по заданным параметрам: место, дата и время, номер государственного регистрационного знака автомобиля, направление дви-

жения, скорость, вид нарушения, данные владельца транспортного средства. Вероятность автоматического распознавания номеров транспортных средств в дневное время достигает 100%. Аппаратные средства комплекса могут функционировать в условиях плохой видимости, при высоких и низких температурах.

Видео- и фотоинформация, собранная с улиц города, выводится на видеостену высокого разрешения, расположенную в Центре мониторинга — главном здании межмуниципального управления полиции. Видеотрансляция осуществляется в режиме реального времени, скорость передачи данных составляет не менее 25 кадров в секунду, что позволяет просматривать детали изображения, в частности черты лица человека с расстояния 150 м. Соединение между элементами видеосистемы осуществляется посредством ВОЛС, организованных «Ростелекомом».

Решения «Ростелекома», внедренные в Нижнем Тагиле, могут успешно работать в других городах и масштабироваться на целые регионы.