

## **Методические погрешности измерения отклонения частоты излучений РЭС в задачах радиомониторинга**

Харченко И.П., Ральников В.И., Ленцман В.Л

### **Введение**

Одним из выводов работы [1] является неочевидное утверждение о неоправданности использования оборудования с малыми инструментальными погрешностями при решении задач радиомониторинга. На первый план в метрологии радиомониторинга выходит проблема учета методических погрешностей дистанционной оценки нормируемых параметров РЭС по результатам измерения параметров излучения передатчиков в штатном режиме и в условиях реальной помеховой обстановки. В частности, очень важно оценить степень влияния вида модуляции, случайного характера реальных модулирующих сигналов, их нестационарности, наличия посторонних излучений, помех и эффектов многолучевого распространения излучений. В данной статье детально рассматриваются методические особенности измерения одного из важнейших параметров передатчиков - отклонения частоты излучения от присвоенного значения.

### **1. Нормы и методы измерения отклонения частоты радиоизлучений**

В соответствии с определениями нормативных документов [2, 3], **допустимое отклонение частоты** – максимально допускаемое отклонение средней частоты полосы частот излучения от присвоенной частоты или характерной частоты излучения от относительной частоты. Нормативные требования к передатчикам различного назначения по допустимому отклонению частоты, установлены ГОСТ Р 50657-94, нормами ГКРЧ 17-99 и другими документами [2-10]. Наиболее высокие требования к допустимому отклонению частоты в диапазонах ОВЧ и УВЧ предъявлены к телевизионным передатчикам (ТВ), рабо-

тающим в режиме точного смещения несущей частоты, -  $\pm 1$  Гц ( $10^{-9} \dots 10^{-8}$ ).<sup>1</sup> Среди других РЭС достаточно жесткие требования предъявляются к обычным ТВ передатчикам и передатчикам ОВЧ ЧМ звукового вещания -  $\pm 100$  Гц ( $10^{-7} \dots 10^{-6}$ ). Нормативные требования к РЭС другого назначения заметно ниже - порядка  $10^{-5}$ . На основе известного положения, что погрешность измерений не должна быть более (0,1...0,3) допуска на контролируемый параметр [2, 12, 13], можно сделать вывод, что предельно допустимая погрешность измерения частоты излучений ОВЧ и УВЧ диапазонов на городских радиоизмерительных пунктах (станциях радиомониторинга) должна находиться в пределах  $\pm (10 \dots 20)$  Гц. Важно подчеркнуть, что эти требования должны учитывать наличие не только инструментальных, но и методических погрешностей, обусловленных спецификой дистанционной оценки отклонения частоты излучения в штатном режиме работы передатчика [1]. Напомним, что методы измерений, регламентируемые документами [2-10], предусматривают оценку отклонения частоты немодулированной несущей при непосредственном подключении частотомера к передатчику.

Для обеспечения достоверности измерений при наличии различного рода методических погрешностей оборудование радиомониторинга должно позволять измерять частоту излучений несколькими различными способами. Чаще всего при измерении частоты излучений [14-16] используют три метода:

- метод прямого счета импульсов, сформированных из сигнала промежуточной частоты измерительного приемника за заданный интервал времени, дополненный программной обработкой с целью устранения грубых и усреднения случайных погрешностей,
- метод измерения «по спектру» - путем программного определения характерных частот в спектре контролируемого излучения,
- метод программного усреднения мгновенной частоты излучения (этот

---

<sup>1</sup> Измерение отклонения частоты таких ТВ передатчиков представляет собой частную специфическую задачу и в этой статье не рассматривается. Как отмечено в [11], сигналы этих передатчиков в некоторых случаях могут

метод обычно используют для оценки девиации частоты).

## **2. Инструментальные погрешности измерения частоты**

Инструментальные погрешности измерения частоты хорошо известны и мы не будем подробно на них останавливаться. Главная составляющая инструментальной погрешности - погрешность, обусловленная старением кварцевого резонатора опорного генератора радиоконтрольного оборудования. Это систематическая, прогрессирующая погрешность, различная для различных экземпляров резонаторов одного типа. Ее значение имеет порядок  $(1...5) \cdot 10^{-10}$  в сутки. Именно эта составляющая погрешности, значение которой при сертификационных испытаниях экстраполируют на межповерочный интервал 1 год (365 дней) и задают интервалом  $\pm (0,4...1,5) 10^{-7}$ , определяет, в основном, инструментальную точность измерения частоты радиоконтрольного оборудования. Вследствие систематического характера численное значение этой погрешности будет почти одинаковым при измерении частоты различных станций, контролируемых в близкие моменты времени. Для обнаружения и последующей программной коррекции систематических инструментальных погрешностей радиоконтрольного оборудования следует периодически проводить измерения частоты станций, несущая частота которых известна, например, уже упомянутых ТВ станций, работающих в режиме точного смещения частоты.

Следует подчеркнуть, что радиомониторинг, в отличие от технического инспекторского контроля отдельных передатчиков, базируется на **совместных** измерениях параметров излучений некоторой совокупности РЭС. При использовании баз данных результатов измерений и соответствующих алгоритмов их статистической обработки результирующая погрешность таких измерений может быть существенно снижена по сравнению с погрешностью обычных многократных прямых измерений.

## **2. Методические погрешности измерения частоты, обусловленные частотной модуляцией излучения.**

---

быть использованы в качестве реперов для оценки точности радиоконтрольного оборудования.

Очевидно, что если измерять среднюю частоту частотно-модулированного сигнала за конечный интервал времени, то результаты будут изменяться от одного измерения к другому. Это изменение можно рассматривать как методическую погрешность оценки средней частоты излучения (т.е. частоты немодулированного излучения) по результатам измерения частоты модулированного сигнала [17]. Если принять в качестве простой модели модулирующего сигнала гармонический сигнал с частотой  $F$ , то мгновенная частота ЧМ сигнала будет определяться выражением:

$$f = f_0 + D \sin (2\pi Ft + \varphi), \quad (1)$$

где  $f_0$  – частота сигнала в отсутствие модуляции,  $D$  - девиация частоты, соответствующая амплитуде модулирующего сигнала,  $\varphi$  - начальная фаза модулирующего сигнала относительно начала времени счета.

Проинтегрировав выражение (1) за интервал времени  $T$  получим формулу для абсолютного отклонения оценки средней частоты ЧМ сигнала от значения  $f_0$ , т.е. соответствующей методической погрешности измерения:

$$\Delta_f = (D/2\pi F T) [\cos \varphi - \cos (2\pi F T + \varphi)] \quad (2)$$

Простой анализ этого выражения позволяет сделать следующие выводы:

1. Если частота импульсов запуска частотомера будет кратна частоте модуляции контролируемого излучения ( $\varphi - const$ ), погрешность измерения частоты будет почти постоянной по значению и знаку – систематической. Разумеется, вероятность такого совпадения невелика, но следует учитывать возможность появления «низкочастотных» составляющих погрешности, которые плохо поддаются программному усреднению;

2. При измерении частоты ЧМ модулированных сигналов, частота модуляции которых  $F$  кратна обратному значению времени измерения  $T$  ( $F = k/T$ , где  $k$  - целое число), погрешность будет отсутствовать;

3. Погрешность будет максимальна, если на интервале времени измерения укладывается нечетное число полупериодов модулирующего сигнала - для сигналов с частотой модуляции  $F$ , равной  $F = (k - 0,5) / T$  при  $\varphi = 0, \pi$ ;

4. Максимальное значение погрешности тем больше, чем ниже частота модуляции:

$$\Delta f_{max} = \pm D / \pi F T. \quad (3)$$

Например, максимальная методическая погрешность измерения за  $T = 1$  с средней частоты ЧМ излучения при  $D = \pm 50$  кГц и  $F = 30$  Гц (ОВЧ ЧМ звуковое вещание) может достигать значений порядка  $\pm 500$  Гц. При  $D = \pm 5$  кГц и  $F = 400$  Гц (телефония) соответствующая методическая погрешность  $\Delta f_{max}$  будет заметно меньше -  $\pm 4$  Гц. Можно также утверждать, что наличие высокочастотной модуляции радиосигнала, обусловленной, например, передачей стереоподнесущей и поднесущих систем частотного уплотнения, большой погрешности измерения средней частоты не вызовет. Эти оценки вполне согласуются с результатами стендовых испытаний радиоконтрольного оборудования [14-16].

Фактически погрешности будут меньше приведенных оценок, поскольку максимум спектра модулирующего сигнала передатчиков ОВЧ ЧМ звукового вещания приходится на частоты порядка 500...700 Гц, а низкочастотным составляющим спектра соответствуют значения девиации частоты, существенно меньшие номинального значения.

Достаточно очевидно, что при измерении частоты ЧМ радиосигнала, модулированного не гармоническим, а случайным сигналом, рассматриваемая методическая погрешность также будет определяться низкочастотными составляющими спектра модулирующего сигнала и носить, в основном, случайный характер. Следовательно, она может быть уменьшена путем программного усреднения. Это положение иллюстрирует рис. 1, где представлены результаты практических измерений отклонения частоты излучения одной из вещательных станций. Первая группа данных на диаграмме – мониторинг отклонения частоты

ты излучения от присвоенного значения по показаниям частотомера, полученным за время счета 1 с. Хорошо видно, что результаты односекундных измерений отклонения частоты имеют случайную погрешность с размахом до  $\pm 45$  Гц (СКО порядка 20 Гц). Включение (в 17:19:32) режима текущего программного усреднения показаний частотомера позволило заметно уменьшить методическую составляющую случайной погрешности, обусловленную влиянием частотной модуляции и четко обнаружить систематическое отклонение частоты излучения передатчика от присвоенного значения, равное минус 32 Гц.

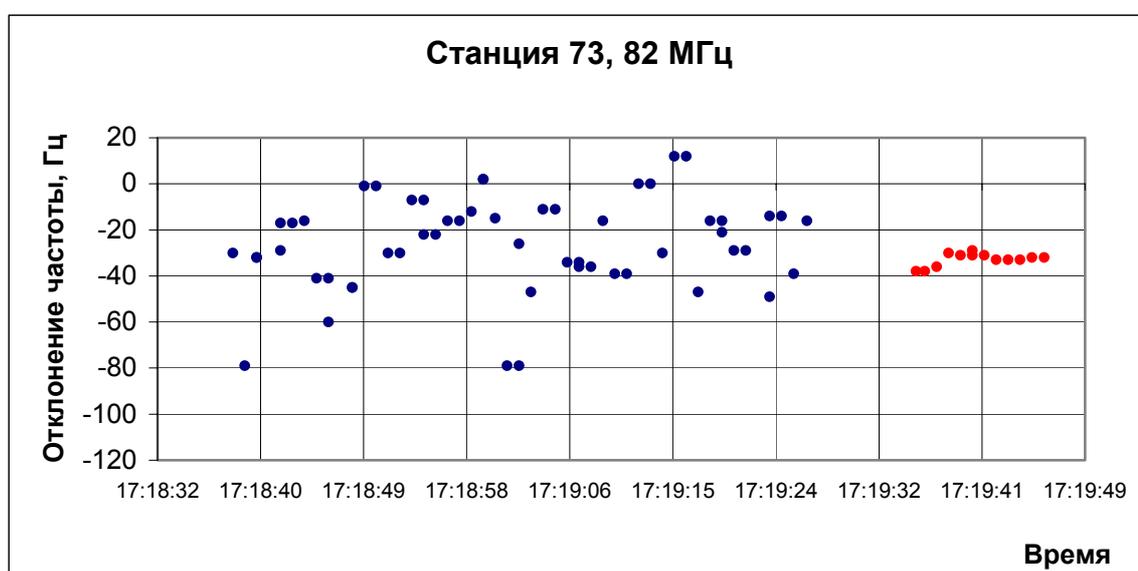


Рис. 1. Результаты радиомониторинга отклонения частоты станции ОВЧ ЧМ звукового вещания в штатном режиме работы передатчика.

Первая группа данных – показания частотомера при времени измерения 1 с.

Вторая группа - после включения (в 17:19:32) текущего программного усреднения.

Более подробно одна из реализаций временной зависимости, характеризующей процесс текущего усреднения частоты ЧМ модулированного излучения во время передачи музыкального фрагмента, показана на рис. 2. Отдельные реализации таких зависимостей часто имеют и немонотонный характер. Путем программного усреднения соответствующая случайная составляющая методической погрешности может быть уменьшена до значений порядка  $\pm 5$  Гц, однако для этого может потребоваться время усреднения порядка 20... 30 с.

Можно представить ситуацию, при которой процесс модуляции вследствие каких-либо нелинейных эффектов может вызвать появление систематического отклонения частоты передатчика относительно его частоты в отсутствие модуляции. В принципе, при достаточном усреднении такое отклонение частоты может быть обнаружено.

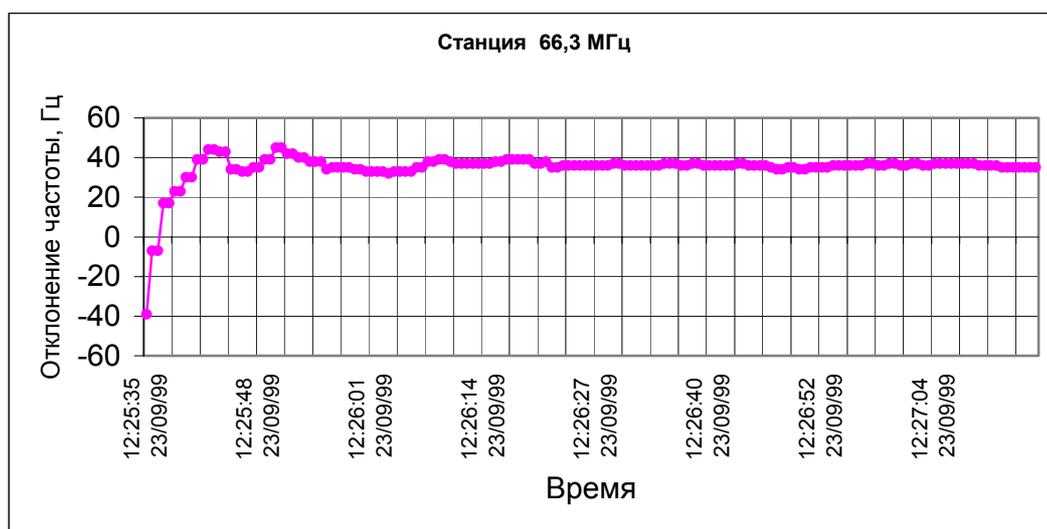


Рис. 2. Зависимость, характеризующая постепенное усреднение показаний частотомера при измерении отклонения частоты ЧМ модулированного излучения

Следует также принять во внимание, что реальные звуковые сигналы являются к тому же и нестационарными. Поэтому для минимизации методических погрешностей при измерении частоты ЧМ передатчиков оператор радиоизмерительного пункта должен контролировать постоянство характера модулирующего сигнала передатчика - на слух и путем визуального анализа спектра и огибающей анализируемого излучения.

Наконец, не следует забывать, что рассматриваемая методическая погрешность практически отсутствует в паузах передачи программ, например, в паузах перед передачей сигналов точного времени и т.п. Поэтому, если такая возможность существует, отклонение частоты излучений РЭС целесообразно контролировать в паузах передачи.

### 3. Методические погрешности, обусловленные влиянием амплитудной модуляцией, импульсным характером излучения, наличием шумов в паузах передачи.

Вопросам измерения среднего значения частоты радиосигнала при наличии шумов посвящена фундаментальная работа [19]. Если правильно выбрать порог срабатывания и зону гистерезиса формирующего устройства частотомера, то погрешность измерения частоты АМ излучений с не очень большими значениями коэффициента амплитудной модуляции (например, менее 90%) при высоком отношении сигнал/шум будет достаточно малой. На рис. 3 представлены результаты измерения отклонения несущей частоты АМ излучения телевизионного передатчика (канал изображения) различными способами. Изменение отклонения частоты со временем характеризует процесс программного усреднения результатов измерений.

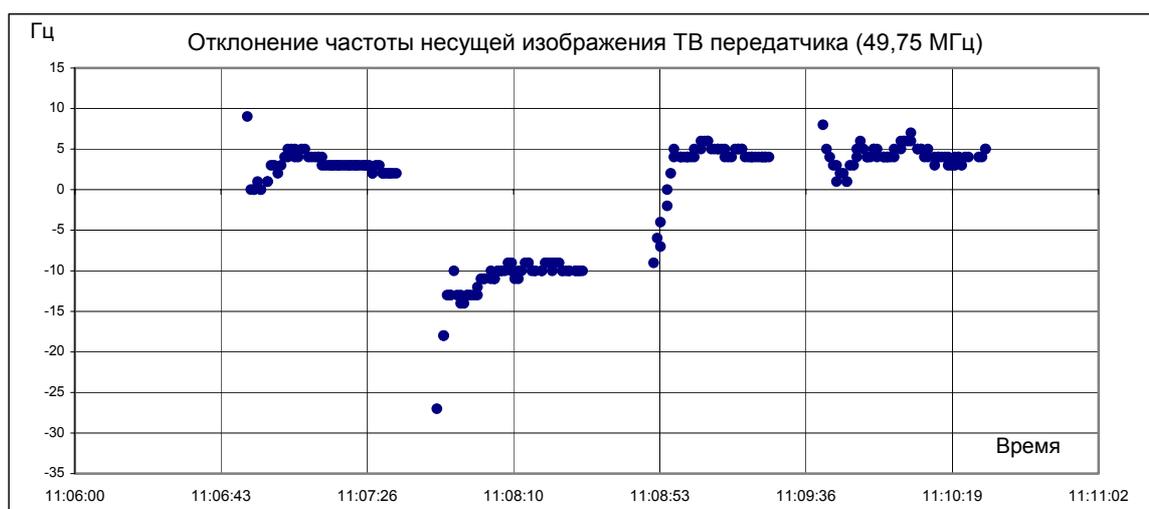


Рис. 3. Результаты измерения отклонения частоты несущей изображения ТВ передатчика различными способами.

Первые две группы данных – измерения с использованием частотомера на промежуточных частотах (ПЧ) 10,7МГц и 455 кГц, третья и четвертая группы – измерения «по спектру» на тех же ПЧ. Уровень сигнала на входе измерительного приемника более 30 дБ. Хорошо видно, что при времени усреднения порядка 30 с соответствующая погрешность не превосходит нескольких герц. Рис. 3 иллюстрирует также целесообразность выполнения измерений частоты

различными способами. Сопоставление данных результатов позволило обнаружить и в дальнейшем устранить небольшую систематическую погрешность (минус 13 Гц), обусловленную неправильной настройкой формирователя частотомера на сигнале ПЧ 455 кГц.

При существенном уменьшении отношения сигнал/шум заметно проявляется влияние систематической составляющей погрешности измерения частотомером средней частоты излучения, обусловленной влиянием шумовых выбросов [19]. В этих условиях режим измерения частоты «по спектру» оказывается особенно полезным.

Измерение частоты излучения импульсного характера с использованием частотомера сопровождается появлением методической погрешности, обусловленной влиянием шума в паузах передачи. Хорошим примером являются попытки измерения электронно-счетным частотомером несущей частоты излучения базовых станций систем персонального вызова (СПРВ, пейджинговой связи) и мобильной связи стандарта GSM. Как правило, такие измерения дают недостоверные значения, поскольку сигнал передатчиков СПРВ появляется в эфире эпизодически, а излучение базовых станций GSM принципиально имеет импульсный характер. Частоту таких излучений целесообразно измерять «по спектру» - путем программной обработки данных о спектре принимаемого радиоизлучения с целью определения одной или нескольких его характерных частот [15,16].

Спектр частотно-манипулированного излучения передатчиков базовых станций СПРВ имеет бимодальный характер. Оценка положения по частоте «центра» такого спектра, полученного в режиме накопления, позволяет измерить среднюю частоту излучения передатчика с методической погрешностью, находящейся в пределах  $\pm (5 \dots 15)$  Гц. Это вполне достаточно для решения задач радиомониторинга.

Спектр излучения базовых станций системы GSM носит «шумоподобный» характер. Однако эти станции периодически излучают так называемый

пакет FB, который используется для синхронизации (подстройки) частоты мобильных терминалов. В этом пакете передается последовательность из 142 битов-нулей, т.е. излучается немодулированная несущая со сдвигом частоты вверх на используемое системой значение девиации частоты 67,708 кГц. В результате в спектре излучения базовой станции периодически появляется характерная составляющая, частоту которой можно измерить «по спектру» (рис.4).

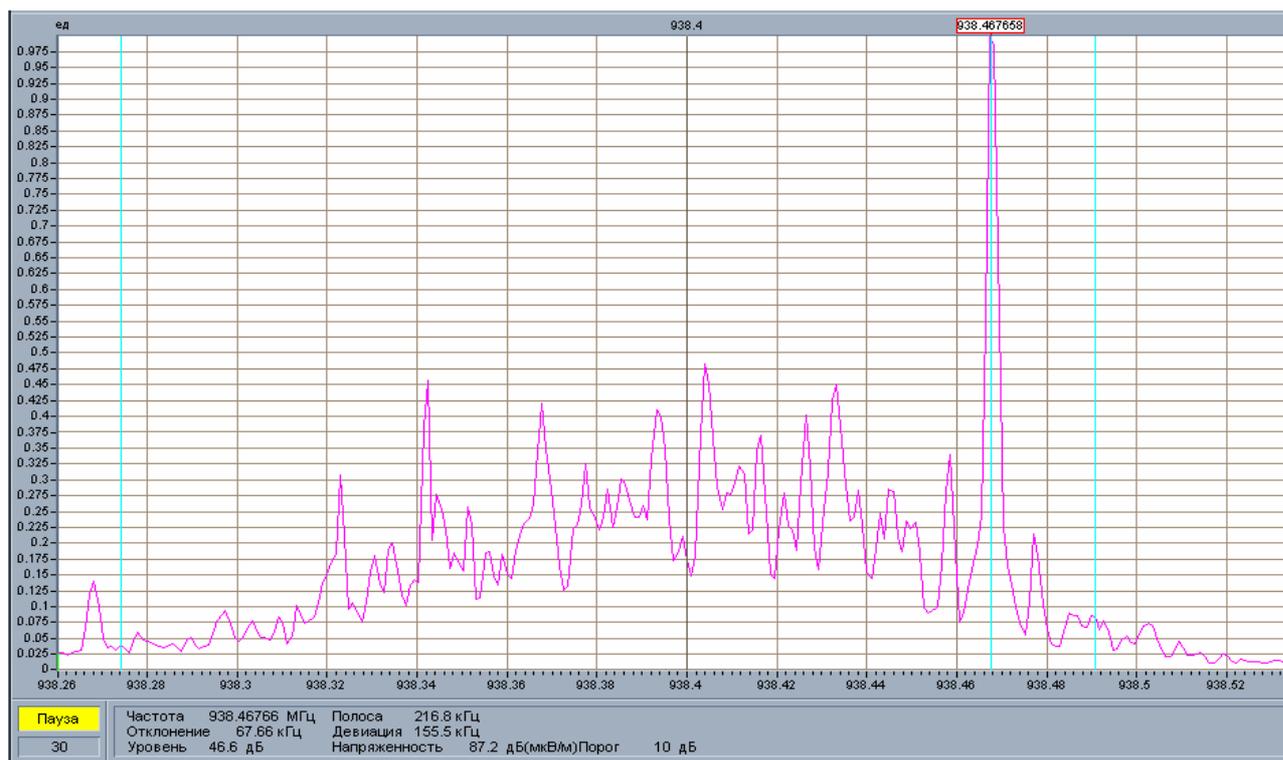


Рис. 4. Спектр излучения базовой станции системы мобильной связи стандарта GSM при передаче пакета FB - пакета синхронизации частоты мобильных станций.

Случайная методическая погрешность таких измерений при использовании оборудования «ИРГА» [14-16] зависит от длительности выборки, от разрешающей способности спектроанализатора и имеет порядок  $\pm 50$  Гц (рис. 5). Эта погрешность имеет систематическую составляющую такого же порядка, обусловленную, в основном, асимметрией участка анализируемого спектра вблизи характерной частоты. При некотором усложнении алгоритма систематическая составляющая погрешности может быть заметно уменьшена.

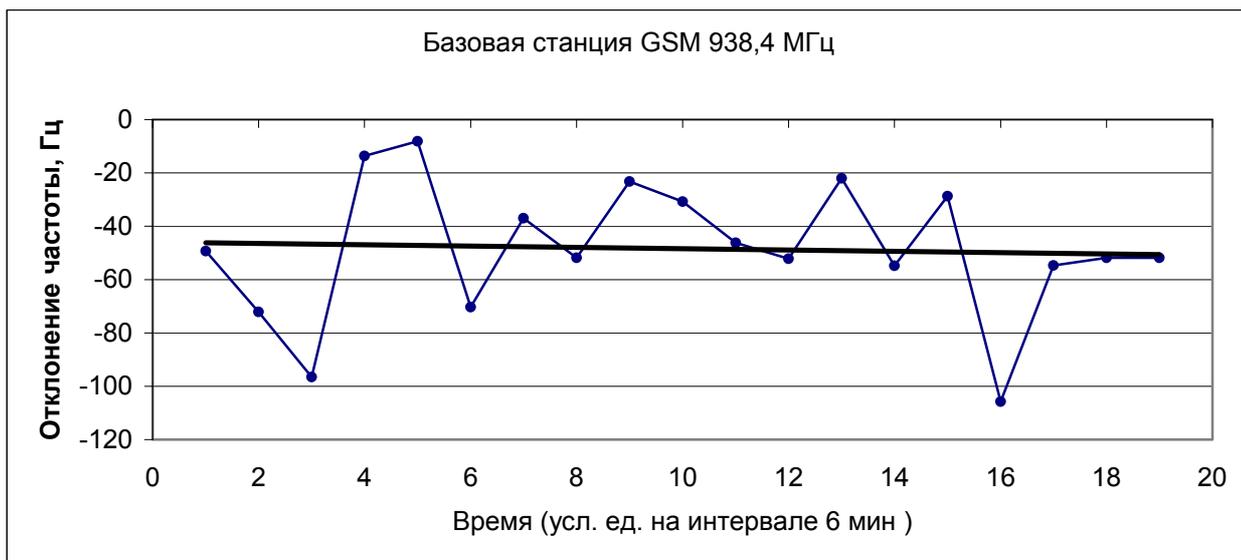


Рис. 5. Результаты измерения отклонения характерной частоты базовой станции системы GSM по пакету FB.

Разумеется, собственные внутрисистемные требования к допустимому отклонению частоты несущей базовых станций GSM очень высоки ( $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ ) и вряд ли операторы системы будут нарушать эти требования. Тем не менее, работники радиоизмерительных пунктов при необходимости могут таким образом проконтролировать с приемлемой погрешностью соблюдение базовыми станциями GSM общих норм на допустимое отклонение передатчиков сухопутных станций в полосе 470 –2450 МГц. По требованиям нормативных документов [2, 3] это отклонение должно находиться в пределах  $\pm 20 \cdot 10^{-6}$  (т.е.  $\pm 18$  кГц в районе 900 МГц). Заметим, что официально утвержденная методика приемки в эксплуатацию базовых станций системы GSM [29] рекомендует использовать для такого контроля более сложное и дорогое оборудование.

#### **4. Методические погрешности, обусловленные влиянием помех и многолучевым распространением излучений.**

На точность измерения частоты излучений существенное влияние может оказать попадание в полосу анализа излучений соседних по частоте станций и импульсных помех. При этом возникают биения, которые приводят к кратковременному снижению отношения сигнал/шум, к ложным срабатываниям входного формирователя электронно-счетного частотомера и, соответственно,

к появлению грубых погрешностей измерения частоты. Аналогичные эффекты могут быть обусловлены также многолучевым распространением излучений ОВЧ и УВЧ диапазонов, что следует учитывать при работе станций радиомониторинга в условиях городской застройки. Практика работы специалистов Проблемной лаборатории по РК и ЭМС при СПб ГУТ на экспериментальном посту радиоконтроля показала, что направленные антенны, обеспечивающие пространственную селекцию, целесообразно использовать для решения практически всех задач радиомониторинга, в том числе и для измерения частоты.

Подчеркнем, что основная нагрузка по уменьшению влияния на результат измерения таких методических погрешностей ложится на оператора радиоизмерительного пункта. Оператор должен выбрать оптимальную ориентацию направленной измерительной антенны, выбрать фильтр, обеспечивающий необходимую частотную селекцию излучения, подключить аттенюатор для согласования уровня принимаемого сигнала с динамическим диапазоном приемника. Путем прослушивания станции, анализа уровня сигнала и характера изменения спектра во времени оператору необходимо определить начало промежутка времени, в течение которого целесообразно измерять параметры излучения, выбрать оптимальное время анализа и зафиксировать результат измерения. Для этой сложной работы оператор должен быть обеспечен соответствующими методиками выполнения измерений и измерительным оборудованием с «дружественным» программным обеспечением.

### **Заключение**

Совершенствование метрологического и методического обеспечения радиомониторинга имеет целью обеспечить сопоставимость результатов измерений параметров излучений, получаемых на различных радиоизмерительных пунктах, в различное время и различными операторами. Систематическая регистрация и анализ текущих результатов радиомониторинга с использованием баз данных позволит сопоставлять эти данные с результатами измерений при вводе РЭС в эксплуатацию и при инспекционных проверках и достоверно вы-

являть случаи нарушений правил эксплуатации РЭС на фоне погрешностей измерений, кратковременных и долговременных изменений условий распространения излучений. Появится возможность целенаправленного планирования инспекторских проверок РЭС и, в обоснованных случаях, непосредственного предъявления штрафных санкций к владельцам РЭС при обнаружении нарушений. По нашему мнению, назрела необходимость утверждения (сначала на ведомственном уровне) специальных методик измерения параметров РЭС на городских радиоизмерительных пунктах (станциях радиомониторинга), которые позволят обеспечить единство таких измерений и, в частности, учесть рассмотренные методические погрешности измерения отклонения частоты. Ряд проектов таких методических документов разработан и проходит апробацию в Проблемной лаборатории по РК и ЭМС при СПб Государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича [21-23].

#### **Список использованных источников**

1. Харченко И.П. Проблемы метрологического обеспечения радиоконтроля. Метрология и измерительная техника в связи. №4, 2001 г.
2. ГОСТ Р 50657-94. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Устройства радиопередающие всех категорий и назначений народнохозяйственного применения. Требования к допустимым отклонениям частоты. Методы измерений и контроля.
3. ГКРЧ. Нормы 17-99. Радиопередатчики всех категорий и назначений. Требования на допустимые отклонения частоты. Методы измерений и контроля. Утв. 29.03.99. Москва. 1999 г.
4. ГОСТ 12252-86. Радиостанции с угловой модуляцией сухопутной подвижной службы. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений
5. ГОСТ 13924-80. Передатчики радиовещательные стационарные. Основные параметры, технические требования и методы измерений

6. ГОСТ 22579-86. Радиостанции с однополосной модуляцией сухопутной подвижной службы, Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений.

7. ГОСТ 22580-84. Радиостанции с угловой модуляцией морской подвижной службы. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений

8. ГОСТ 26897-86. Радиостанции с однополосной модуляцией морской подвижной службы. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений.

9. ОСТ 45.125-99. Передатчики радиовещательные ОВЧ диапазона, работающие в режиме частотного уплотнения. Параметры, технические требования, методы измерений.

10. Правила технической эксплуатации средств вещательного телевидения (ПТЭ-95). Министерство связи РФ. Управление сетей радиосвязи, радиовещания и телевидения. - М.: «Радио и связь». 1995. Дополнения и коррекция Правил технической эксплуатации средств вещательного телевидения (ПТЭ-95). Утверждены 27 августа 1997 г. Государственный комитет РФ по связи и информатизации. Управление радио, телевидения и спутниковой связи. - М.: «Радио и связь». 1997.

11. Справочник по радиоконтролю. Издание МСЭ - Р. 1995 г.

12. ГОСТ Р 8.563-96. ГСИ. Методики выполнения измерений.

13. ОСТ 45.150-99. Стандарт отрасли «Связь». Методики выполнения измерений. Порядок разработки и аттестации.

14. Измерительная установка ИУ2. Технические условия ИПУШ.468166.003. Санкт-Петербург. 1998 г.

15. Измерительная установка ИУ2. Руководство по эксплуатации. ИПУШ.468166.003.РЭ. Санкт-Петербург. 2000 г.

16. ПО «Radio Score». Инструкция пользователя. ИПУШ.468166.003.ИП. Санкт-Петербург. 2000 г.

17.Измерение параметров излучений РЭС на радиоконтрольных постах. Материалы семинара повышения квалификации сотрудников региональных управлений ГСН России. 27.11 – 01.12.00. Санкт-Петербург.: Проблемная лаборатория по РК и ЭМС. 2000г.

18.Радиовещание и электроакустика. Учебное пособие для ВУЗов. Под ред. Ю. А. Ковалгина.- М.: Радио и связь, 1999.- 792 с.

19. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970. -392 с.

20.Программа и методика технических испытаний системы сотовой радиотелефонной связи стандарта GSM при приемке и вводе в эксплуатацию законченного строительством объекта связи. Утверждена Зам. Министра РФ по связи и информатизации 31.03.2000.

21.Временная методика радиоконтроля отклонения частоты радиоизлучений. Проблемная лаборатория по РК и ЭМС при СПб ГУТ. СПб. 2001 г.

22.Временная методика радиоконтроля ширины занимаемой полосы частот радиоизлучений. Проблемная лаборатория по РК и ЭМС при СПб ГУТ. СПб. 2001 г.

23.Временная методика радиоконтроля девиации частоты радиоизлучений станций ОВЧ ЧМ вещания и звукового сопровождения ТВ. Проблемная лаборатория по РК и ЭМС при СПб ГУТ. СПб. 2001 г.