

## УЧЕТ НЕСТАБИЛЬНОСТИ НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### Введение

В радиотехнических системах (РТС) передачи и извлечения информации используются процедуры согласованной фильтрации и корреляционной обработки [1 – 8]. Эти процедуры являются составной частью оптимальных схем обнаружения сигналов и измерения их параметров, при этом оптимальность понимается в смысле максимизации отношения сигнал/шум (ОСШ) и зависящих от ОСШ качественных показателей РТС. Синтез оптимальных схем обнаружения-измерения произведен при нескольких упрощающих предположениях. Среди них – предположение о стационарности обрабатываемого сигнала, а также о характеристиках шума в приемном канале системы.

В реальных РТС принимаемый сигнал часто нельзя назвать стационарным. Параметры сигнала зависят от времени, что обусловлено изменением свойств среды распространения сигнала, изменением расстояния между источником и приемником сигнала или относительной скорости источника и приемника, а также изменением параметров элементов системы. В частности, частота колебаний, формируемых задающими генераторами передающего и приемного устройства, не является строго постоянной, а испытывает случайные вариации, вызванные изменениями температуры, питающих напряжений и фазовых сдвигов в частото-задающих цепях [9]. Наличие случайных вариаций частоты принимаемого сигнала приводит к снижению отношения сигнал/шум в устройствах оптимальной обработки принимаемых сигналов.

### Постановка задачи

В реальной РТС вариации частоты обрабатываемого сигнала вызваны, в частности, нестабильностью частот задающих генераторов (ЗГ). Частоты задающих генераторов не постоянны – вследствие изменения температуры, питающих напряжений и параметров радио-электронных приборов любой генератор формирует колебания, частота которых подвержена вариациям. Стабильность частоты колебаний генератора принято оценивать безразмерной величиной

$$\sigma_{fo} = \sigma_{fa} / f_0 \quad (1)$$

– относительной нестабильностью несущей частоты (отношением среднеквадратического отклонения (СКО) мгновенной частоты генератора  $\sigma_{fa}$  к ее номинальному значению  $f_0$ ).

Для упрощения дальнейших рассуждений примем, что в приемном устройстве РТС производится оптимальная обработка принимаемого сигнала  $x(t)$  с применением процедуры согласованной фильтрации или корреляционной обработки [1, 2]. При этом без потери общности будем опираться на схему корреляционного приемника [1, 8, 10]. Получаем оценку энергии сигнала

$$E' = \int_0^T x(t) \cdot x_0(t) dt, \quad (2)$$

где  $x(t)$  – обрабатываемый сигнал, а  $x_0(t)$  – опорный сигнал,  $T$  – длительность обрабатываемого сигнала.

Введем величину  $\Delta E_d$  – допустимые потери энергии сигнала при его обработке в приемном устройстве. Для каждой конкретной РТС можно условно разделить вариации частоты ЗГ на медленные и быстрые. При этом медленные вариации соответствуют случаю, когда

потери энергии вследствие изменений частоты сигнала за время действия импульса много меньше  $\Delta E_d$  и ими можно пренебречь. В этом случае можно принять, что частота принимаемого сигнала изменяется от импульса к импульсу, но постоянна во время действия импульса. При этом потери энергии связаны с неравенством центральных частот принимаемого и опорного сигналов. Таким образом, приходим к случаю обработки стационарного сигнала с априорно неизвестным параметром, и для уменьшения потерь энергии можем использовать многоканальную приемную схему [10, 11]. Быстрые вариации, напротив, соответствуют случаю, когда потерями энергии за счет внутриимпульсных вариаций частоты пренебречь нельзя. При этом обрабатываемый сигнал нужно рассматривать как нестационарный.

Для оценки количественных показателей энергетических потерь, вызванных нестабильностью частот задающих генераторов, необходимо задаться законами распределения мгновенных значений центральной частоты ЗГ для медленных и быстрых вариаций частоты. Быстрые вариации частоты обусловлены изменениями фазовых сдвигов в цепи обратной связи генератора [9], и являются результатом воздействия многих факторов. В связи с этим можно высказать гипотезу о нормальном законе распределения для мгновенных значений частоты в силу центральной предельной теоремы [12]. Для проверки гипотезы о нормальности закона распределения мгновенных значений частоты генераторов был проведен натуральный эксперимент с генераторами Г3-109, Г6-15, Г4-153. В ходе эксперимента в течение восьми часов измерялись мгновенные значения частот колебаний, формируемых генераторами, после чего к полученному случайному процессу  $f(t)$  была применена проверка по критерию Колмогорова – Смирнова. На уровне значимости 0,95 закон распределения значений быстрых вариаций мгновенной частоты для всех исследованных генераторов – нормальный, что подтверждает предположение о наличии ряда независимых факторов, влияющих на фазовые соотношения в петле обратной связи задающего генератора. В то же время медленные вариации представляют собой дрейф частоты генератора при его прогреве, а также при изменении питающих напряжений. Законы распределения этих вариаций для исследованных генераторов различны, вариации не всегда симметричны относительно центральной частоты.

### Представление результатов

Потери энергии при обработке сигнала будут зависеть от разности между текущим значением центральной частоты в спектре принимаемого сигнала и ее ожидаемым значением. Поскольку разность мгновенных частот не является статистически устойчивой величиной, применим в качестве метрики нестабильности абсолютную СКО несущей частоты  $\sigma_{fa}$ . Помимо СКО вариаций несущей частоты потери зависят еще и от ширины полосы частот сигнала  $\Delta f$ . Введем безразмерную величину

$$\xi = \frac{\sigma_{fa}}{\Delta f} \quad (3)$$

– нормированную СКО вариаций частоты сигнала. Для прямоугольного радиоимпульса, ширина главного лепестка спектра которого  $\Delta f = 2/\tau_u$  [9], можно записать:

$$\xi = \frac{\sigma_{fo} \cdot f_0 \cdot \tau_u}{2}. \quad (4)$$

Зависимость потерь энергии  $\Delta E(\xi) = E_0/E(\xi)$ , полученная методом имитационного моделирования для случая медленных вариаций, представлена на рис. 1. При этом медленные вариации частоты имитировались в виде авторегрессионного (АР) процесса [13], кривые 1 и 2 соответствуют радиоимпульсу с огибающей в виде функции Гаусса, а кривые 3 и 4 – радиоимпульсу с прямоугольной огибающей. С ростом нормированной СКО вариаций частоты сигнала потери увеличиваются. При этом потери максимальны при учете вариаций частоты ЗГ приемника и передатчика (кривые 1, 3). В случае учета лишь вариаций частоты одного из ЗГ (кривые 2, 4) оценка величины потерь оказывается ниже. Эта ситуация имитирует систе-

му радиосвязи с подвижным объектом: в подобных системах нестабильность частоты ЗГ базовой станции обычно гораздо меньше нестабильности частоты ЗГ мобильного терминала.

По зависимости  $\Delta E(\xi)$ , построенной для применяемого в данной РТС сигнала, можно оценить предельно допустимое значение  $\xi$  для заданных наперед допустимых потерь энергии сигнала  $\Delta E_D$ .

Рассмотрим многоканальную приемную систему со стационарной эквидистантной сеткой опорных сигналов  $x_{0i}(t)$ . При этом шаг сетки обозначим через  $\varepsilon$ . Тогда число каналов системы

$$N_k = \left\lfloor \frac{\Delta\alpha}{\varepsilon} \right\rfloor \quad (5)$$

для области параметров сигнала  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  [11].

Введем обозначение

$$\gamma = \frac{\varepsilon}{\Delta f} \quad (6)$$

– относительный шаг сетки многоканальной приемной системы. На рис.2 приведена зависимость потерь энергии от относительного шага сетки, построенная для прямоугольного радиоимпульса.

С ростом шага сетки потери энергии увеличиваются. При этом оптимальный шаг сетки  $\varepsilon_o$  можно определить, задавшись допустимыми потерями энергии в системе  $\Delta E_D$ . Максимальные пределы вариаций частоты определяются параметрами задающих генераторов системы, и могут быть оценены по правилу «трех сигма»:  $f_{\max} = f_0 + 3 \cdot \sigma_{fa}$ ,  $f_{\min} = f_0 - 3 \cdot \sigma_{fa}$ , следовательно

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} = 6 \cdot \sigma_{fa}. \quad (7)$$

Для определения требуемого числа каналов приемного устройства получим из (6)

$\varepsilon_o = \gamma_o \cdot \Delta f$ , и далее с учетом (7) можем записать  $N_k = \left\lfloor \frac{6 \cdot \sigma_{fa}}{\gamma_o \cdot \Delta f} \right\rfloor$ , или

$$N_k = \left\lfloor \frac{6 \cdot \xi}{\gamma_o} \right\rfloor. \quad (8)$$

При использовании многоканального приемного устройства со стационарной эквидистантной сеткой и  $N_k$  каналами, потери энергии не превысят заданного наперед значения  $\Delta E_D$ .

Рассмотрим вопрос о величине потерь энергии для случая быстрых вариаций частоты ЗГ. При этом принимаемый сигнал можно записать в виде

$$x(t) = A(t) \cdot \exp(-j\omega(t) \cdot t), \quad (9)$$

причем

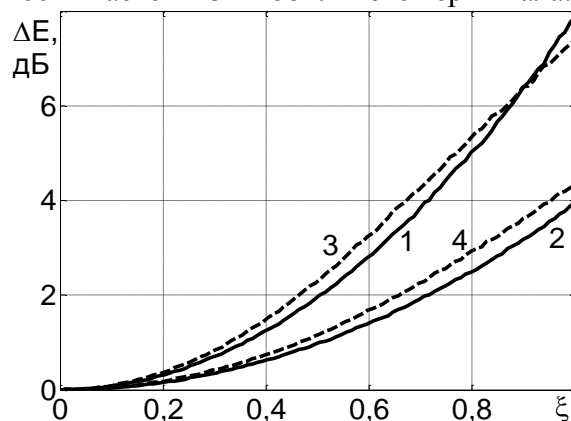


Рис. 1

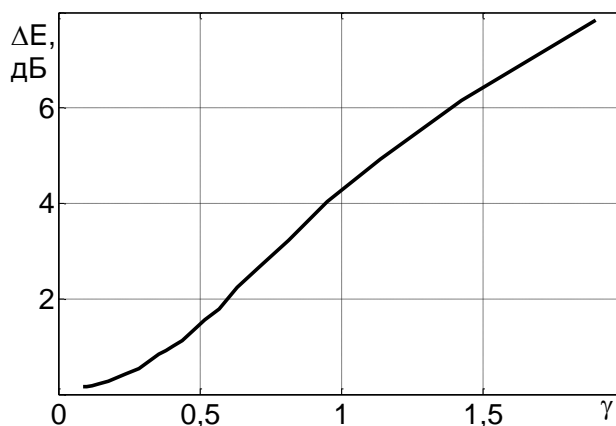
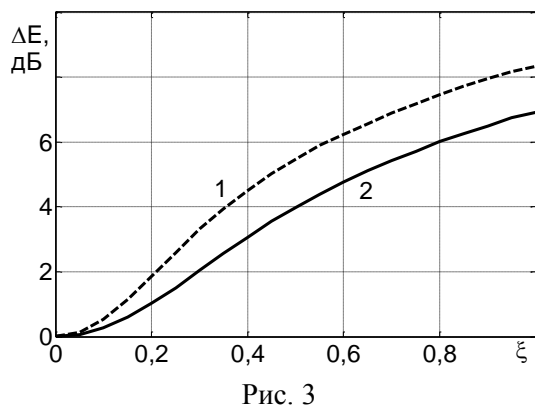


Рис. 2

$$\omega(t) = 2\pi(f_0 + \sigma_{fa} \cdot n(t)), \quad (10)$$

где  $n(t)$  – случайная величина с нормальным законом распределения, нулевым средним и единичной дисперсией. Внутриимпульсные вариации частоты будут приводить к расширению спектра сигнала и искажению его формы. Кроме того, наличие таких вариаций приводит к неидентичности наблюдаемого и опорного сигналов, что снижает коэффициент взаимной корреляции и соответственно оценку энергии принимаемого сигнала в корреляторе или согласованном фильтре. На рис. 3 приведена зависимость потерь энергии от нормированной СКО внутриимпульсных вариаций частоты принимаемого сигнала. Характер зависимости схож с приведенной на рис. 1, величины потерь соизмеримы. Кривая 1 соответствует учету вариаций частоты ЗГ приемника и передатчика, кривая 2 – учету вариаций лишь одного из ЗГ.



Поскольку среднее значение частоты принимаемого сигнала (10)  $\bar{\omega} = 2\pi \cdot f_0$ , применение многоканального по частоте приемника не приведет к снижению энергетических потерь, как в случае межимпульсных вариаций центральной частоты сигнала. Рассмотрим следующую модификацию многоканального корреляционного приемника. Пусть в  $N_k$ -канальном приемнике опорными сигналами служат радиоимпульсы вида (9) с независимыми реализациями мгновенной частоты сигнала (10).

В табл. 1 приведены результаты оценивания энергетических потерь в такой схеме для  $\xi=1$ .

Таблица 1 С ростом числа каналов энергетические потери уменьшаются, однако эффект выражен очень слабо. Применение параллельной схемы с 16384

$N_k$	$\Delta E, \text{дБ}$
1	8.56
2	8.31
4	8.19
64	7.87
2048	7.62
16384	7.48
65536	7.43
262144	7.35

каналами позволяет снизить энергетические потери примерно на 1 дБ при условии использования отдельных независимых тактовых генераторов в опорных каналах. Опорные сигналы вида (9) со случайной частотой заполнения могут формироваться в цифровой форме непосредственно в устройстве обработки. Подобное решение может быть реализовано на базе графических процессоров (ГП) или других параллельных вычислительных устройств [10, 11, 14, 15].

В рамках существующей РТС характеристики ЗГ заданы, а длительность импульса может варьироваться в зависимости от необходимой дальности передачи сигнала. Поскольку длительность импульса связана с занимаемой им полосой частот, то при увеличении длительности импульса возрастает относительная СКО вариаций частоты (4) и соответственно увеличиваются потери энергии при обработке сигнала. Оценим оптимальную длительность импульса послышки.

В отсутствие флуктуаций частоты сигнала, оценка энергии сигнала пропорциональна длительности импульса  $E' = \alpha \cdot \tau_u$ , откуда

$$\frac{E(m \cdot \tau_u)}{E(\tau_u)} = m. \quad (11)$$

При наличии флуктуаций частоты, результирующая оценка энергии оказывается занижена на величину  $\Delta E$  (рис. 1, 3). При этом коэффициент  $m$  (11) является функцией относительного СКО вариаций частоты ЗГ:

$$K_m(\xi) = \frac{E(m \cdot \tau_u)}{E(\tau_u)}. \quad (12)$$

В дальнейшем будем называть величину (12) показателем эффективности накопления энергии сигнала.

В табл. 2 приведена зависимость коэффициента  $K_m$  от относительного СКО вариаций частоты ЗГ. В этом случае принято двукратное изменение длительности импульса, и соответственно при отсутствии вариаций ( $\xi=0$ ), получаем  $m=2$ . При  $\xi \leq 0.1$  потери энергии сравнительно невелики, однако при больших значениях относительного СКО вариаций увеличение длительности импульса оказывается малоэффективным.

Таблица 2

$\xi$	$K_2(\xi)$
0	2.00
0.01	1.99
0.02	1.98
0.03	1.97
0.04	1.94
0.05	1.91
0.10	1.68
0.20	1.25
0.50	1.05

Таким образом, для прямоугольного радиоимпульса из (4) можно вывести ограничение:

$$\tau_u \leq \frac{2 \cdot \xi_{\max}}{\sigma_{f_0} \cdot f_0}, \quad (15)$$

где  $\xi_{\max}$  – максимальная величина СКО вариаций частоты ЗГ, при которой эффективность накопления энергии не снижается далее установленного предела.

### Выводы

Нестабильности частоты задающих генераторов радиотехнической системы приводят к снижению отношения сигнал/шум и соответствующему ухудшению качественных показателей системы. Наличие нестабильности снижает эффективность согласованной фильтрации и ограничивает максимальную длительность импульса, при которой накопление энергии в приемном устройстве эффективно. В случае, когда вариациями частоты за время действия импульса можно пренебречь, потери энергии можно уменьшить, применяя параллельную систему обработки. Для случая «быстрых» вариаций частоты этот подход малоэффективен.

**Список литературы:** 1. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 2004. – 608 с. 2. Обнаружение радиосигналов / П.С.Акимов и др. ; под ред. А.А.Колосова. – М. : Радио и связь, 1989. – 224с. 3. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала. – М. : Сов. радио, 1970. – 336с. 4. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации : учебник для вузов / М.И.Финкельштейн. – 2-е изд. – М. : Радио и связь, 1983. – 536с. 5. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов ; под ред. Я.Д. Ширмана. – М. :Сов. радио, 1970. – 560с. 6. Radar signal processing. Robert J. Purdy et.al. // Lincoln Laboratory Journal, volume 12, number 2, 2000, pp. 297-320. 7. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем : учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 1986. – 280с. 8. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория : справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Миневрин и др. ; под ред. Я.Д.Ширмана. – М. : ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828с. 9. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2005. – 462с. 10. Литвин-Попович А.И. Обнаружение сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности / А.И. Литвин-Попович // Радиотехника. – 2012. – Вып. 168. – С.16 – 21. 11. Литвин-Попович А.И. Обнаружение и измерение параметров сигналов в параллельных системах обработки / А.И. Литвин-Попович. – Радиотехника. – 2012. – Вып.170. – С. 125 – 131. 12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие для студентов втузов / Е.С.Вентцель, Л.А.Овчаров. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. центр «Академия», 2003. – 464с. 13. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл. – М. : Мир, 1990. – 584 с. 14. Литвин-Попович А.И. Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах / А.И. Литвин-Попович // Радиотехника. – 2011. – Вып. 166. – С. 165 – 172. 15. NVIDIA® Tesla® GPU Accelerators]. Режим доступа: <http://www.nvidia.com/object/personal-supercomputing.html>

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.03.2014