

## ОБНАРУЖЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ

### Введение

Рассмотрим задачу обнаружения сигнала на фоне шума. При наличии полной априорной информации о параметрах сигнала процедура оптимальной обработки сводится к оцениванию энергии сигнала и сравнению полученной оценки с пороговым значением [1]. В случае если один или несколько параметров сигнала неизвестны априорно, используются многоканальные приемники обнаружения [1 – 3]. При этом для каждого из неизвестных параметров  $\alpha$  создается сетка каналов, рассчитанных на обнаружение сигнала с параметрами  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ . В общем случае, при отсутствии информации о законе распределения ожидаемого значения параметра  $\hat{\alpha}$ , сетка является эквидистантной с шагом  $\varepsilon$  [4]. Такое решение обеспечивает возможность обнаружения сигнала с параметром  $\alpha$ , лежащим в диапазоне  $\alpha_1 \dots \alpha_N$ , со сколь угодно малой потерей вероятности относительно случая полностью известного сигнала [1]. Вместе с тем, с ужесточением требований к величине потерь вероятности правильного обнаружения, увеличивается требуемое число каналов приемника и возрастает вычислительная сложность процедуры обнаружения. Величина потерь вероятности правильного обнаружения зависит от энергии сигнала, а оценка энергии пропорциональна функции от расстройки  $\hat{\alpha} - \alpha_i$  для  $i$ -го канала. Следовательно, шаг сетки однозначно определяется требованиями к вероятности правильного обнаружения.

Число каналов приемника определяется шагом сетки  $\varepsilon$  и диапазоном возможных значений величины  $\alpha$ :

$$N_k = \left\lceil \frac{\Delta\alpha}{\varepsilon} \right\rceil, \quad (1)$$

где  $\Delta\alpha = \alpha_N - \alpha_1$  – диапазон изменения параметра  $\alpha$  [4].

Рассмотрим случай, когда величины параметра  $\alpha$  в последовательных сеансах обнаружения не являются статистически независимыми. Допустим, что  $\alpha(t)$  представляет собой случайный процесс с некоторой известной априорно плотностью распределения. При этом оказывается, что величина  $\alpha(t_1)$  может быть с некоторой погрешностью спрогнозирована по имеющимся оценкам  $\alpha'(t_1 - \Delta t) \dots \alpha'(t_1 - k \cdot \Delta t)$ , где  $\Delta t$  – период повторения процедуры оценивания параметров сигнала. Предположим, что максимальное изменение параметра за интервал  $\Delta t$  составляет  $\Delta\alpha'$ . Тогда число каналов приемника может быть уменьшено, и составит

$$N_k' = \left\lceil \frac{2 \cdot \Delta\alpha'}{\varepsilon} \right\rceil. \quad (2)$$

В результате можно получить более высокий темп выдачи результатов в существующей РТС, обнаружить сигналы с несколькими априорно неизвестными параметрами либо осуществлять параллельное обнаружение нескольких сигналов без ужесточения требований к аппаратному обеспечению. Реализация подобного приемника обнаружения требует наличия априорных оценок ожидаемой величины параметра  $\alpha$ , а также информации о доверительном интервале таких оценок. Рассмотрим совмещение процедур обнаружения и оценивание параметров сигнала на базе многоканального корреляционного приемника. При этом будем полагать, что единственным неизвестным параметром сигнала является  $\alpha$ .

## Постановка задачи

Пусть имеется некоторый сигнал  $x(t, \alpha_R)$  с априорно неизвестным параметром  $\alpha = \alpha_R$ . Непосредственному наблюдению доступна реализация  $s(t) = d \cdot x(t, \alpha_R) + n(t)$ , представляющая смесь данного сигнала с шумом  $n(t)$ . Требуется по реализации  $s(t)$  обнаружить факт наличия полезного сигнала и оценить значение неизвестного параметра  $\alpha$ .

Для оценивания неизвестных параметров сигнала можно применить многоканальный коррелятор, опорными сигналами для каналов которого являются сигналы  $x(t, \alpha_i)$ , с заданным наперед для каждого канала значением  $\alpha_i$ . На выходе многоканального коррелятора формируется набор оценок энергии  $E_i$  для каждого из каналов в отдельности, характеризующих степень корреляции сигнала  $x(t, \alpha)$  и опорного сигнала  $x(t, \alpha_i)$ :

$$E_i = \int_0^T x(t, \alpha_R) \cdot x(t, \alpha_i) dt. \quad (3)$$

Таким образом, на выходе многоканального коррелятора получаем оценку функции  $E(\alpha)$ , по которой и оцениваем параметр  $\alpha$ .

Погрешность  $\delta\alpha$  оценивания параметра определяется величиной производной  $\partial E / \partial \alpha$  вблизи истинного значения параметра  $\alpha_R$ , отношением сигнал/шум, а также шагом сетки коррелятора  $\varepsilon = \alpha_j - \alpha_{j-1}$ . При прочих равных условиях минимизация  $\delta\alpha$  возможна путем увеличения  $\partial E / \partial \alpha$  и уменьшения  $\varepsilon$ .

Введем обозначение:  $\xi = \Delta\alpha_{0.5}$  – эффективная ширина автокорреляционной функции входного сигнала по неизвестному параметру  $\alpha$ , по уровню половинной энергии. В дальнейшем, шаг сетки многоканального коррелятора нормируем к этой величине.

Схемы рассмотренных приемников обнаружения приведены на рис. 1.

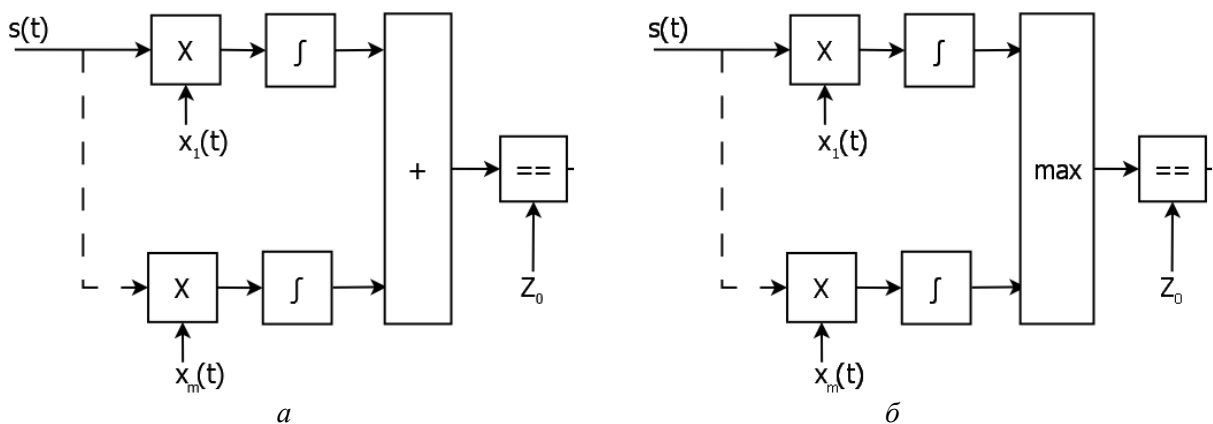


Рис. 1. Структурные схемы многоканальных приемников обнаружения

Пороговые значения  $Z_0$  определяются в соответствии с критерием Неймана – Пирсона [2]. Поскольку каждый из каналов вносит долю в оценку энергии шума, пороговые значения оказываются в данных схемах зависящими от числа каналов.

Для схемы 1 (рис.1, а) зависимость является линейной (4), а для схемы 2 (рис.1, б) – степенной (5). Величины  $a...e$  в (4,5) определяются путем имитационного моделирования.

$$Z_{01} = a \cdot N + b. \quad (4)$$

$$Z_{02} = c \cdot N^d + e. \quad (5)$$

Характеристики обнаружения для обеих схем приведены на рис. 2. При этом рассмотрены случаи с различным числом каналов, соответственно и с различным шагом сетки. С ростом числа каналов вероятность правильного обнаружения возрастает. В то же время для первой схемы заметна значительно меньшая скорость роста вероятности с увеличением числа каналов.

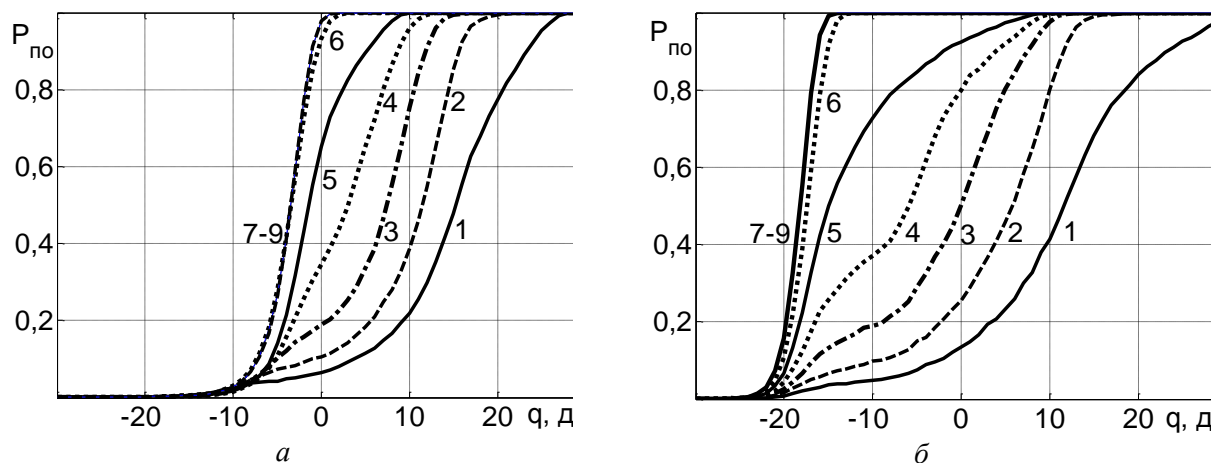


Рис. 2. Характеристики обнаружения для схемы 1 (а) и схемы 2 (б) при вероятности ложной тревоги  $10^{-3}$ . Число параллельных каналов – 16 (кривая 1), 32 (2), 64 (3), 128 (4), 256 (5), 512 (6), 1024 (7), 2048 (8), 4096 (9) ( $\epsilon = 31$  (1), 15,4 (2), 7,7 (3), 3,8 (4), 1,9 (5), 0,97 (6), 0,48 (7), 0,24 (8), 0,12 (9)).

Сопоставим полученные результаты с характеристикой обнаружения, построенной для случая полностью известного сигнала. Соответствующие графики приведены на рис. 3.

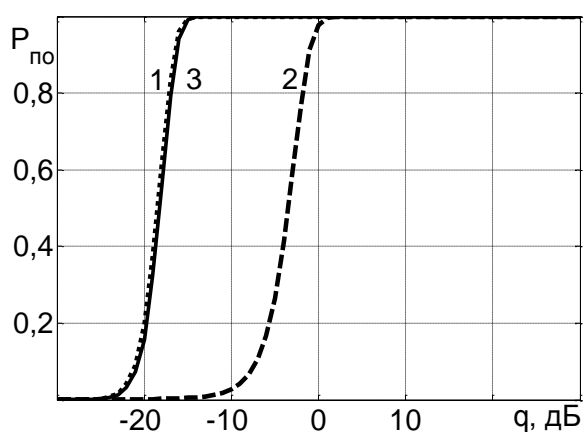


Рис. 3. Характеристики обнаружения (1 – случай полностью известного сигнала, 2 – схема 1, 3 – схема 2 ( $\epsilon=0,12$ ))

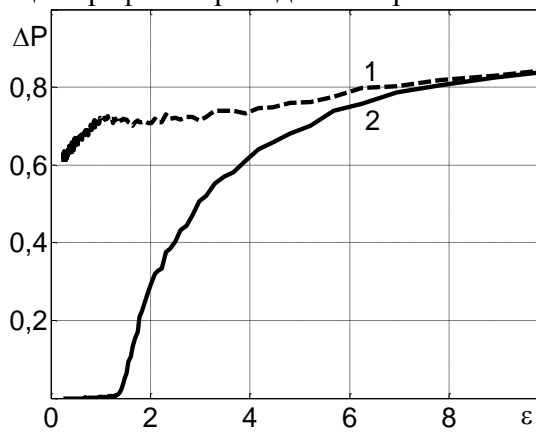


Рис. 4. Зависимость потерь вероятности правильного обнаружения от шага сетки ( $q = -10$  дБ)

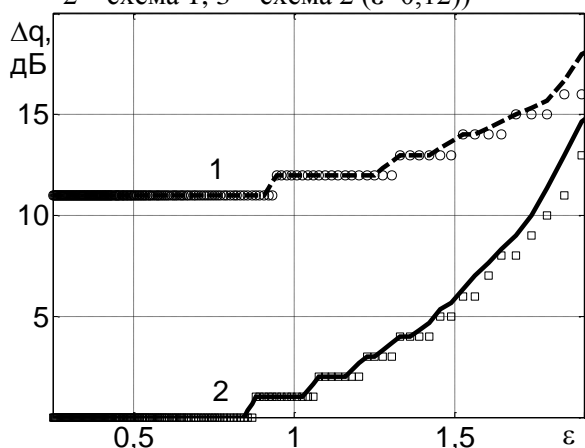


Рис. 5. Зависимость энергетических потерь от шага сетки (1 – схема 1, 2 – схема 2).  
Опорный уровень вероятности – 0,9

С увеличением шага сетки вероятность правильного обнаружения снижается. Для схемы 2 характерны меньшие потери вероятности правильного обнаружения (рис.3, кривая 3). При стремлении шага сетки к нулю схема 2 обеспечивает величину вероятности правильного обнаружения, стремящуюся к величине, получаемой в случае полностью известного сигнала (рис.4). Энергетические потери для схемы 2 также меньше (рис.5). Для схемы 2 из рис.5 можно определить, что при  $\epsilon \leq 0,8$  потери энергии пренебрежимо малы. Для схемы 1, вне зависимости от шага сетки, потери энергии не менее 10 дБ.

Значительные энергетические потери в схеме 1, по-видимому, связаны с вкладом в результирующую оценку со стороны каналов, на выходе которых присутствует только шум. Вместе с тем, в схеме 2 вклад в конечную оценку энергии дает только канал с наибольшей величиной взаимной корреляции между принимаемым и опорным сигналом. В слу-

чае если значение неизвестного параметра не точно равно его значениям в узлах сетки, значение оценки энергии будет занижено, однако эта погрешность уменьшается с уменьшением шага сетки. В дальнейшем будем рассматривать схему 2, как обеспечивающую более эффективное использование энергии сигнала.

Рассмотрим статистические характеристики оценок параметра  $\alpha$  в многоканальной системе. Оценка  $\alpha'$  параметра  $\alpha$  может быть записана в виде

$$\alpha' = \alpha + \delta\alpha_s + \delta\alpha_r, \quad (6)$$

где  $\delta\alpha_s$  и  $\delta\alpha_r$  – соответственно систематическая и случайная погрешности оценивания параметра. Случайная погрешность оценивания определяется соотношением сигнал/шум, а систематическая – методом измерения. Суммарная погрешность  $\delta\alpha$  может быть оценена как  $\delta\alpha = \delta\alpha_s + \overline{\delta\alpha_r}$ . При необходимости раздельного рассмотрения случайной и систематической составляющих погрешности, можно поступить следующим образом. С ростом отношения сигнал/шум,  $\overline{\delta\alpha_r} \rightarrow 0$ , таким образом можно записать

$$\delta\alpha_s \approx \delta\alpha|_{q \gg 1}. \quad (7)$$

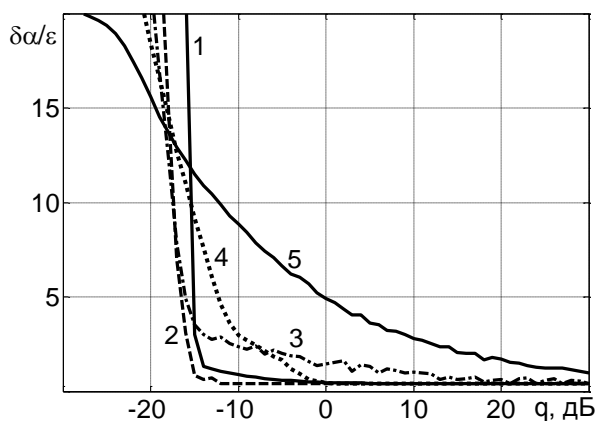


Рис. 6. Зависимость СКО оценок от отношения сигнал/шум ( $\epsilon = 0.05$  (1),  $0.5$  (2),  $1$  (3),  $1.5$  (4),  $2$  (5))

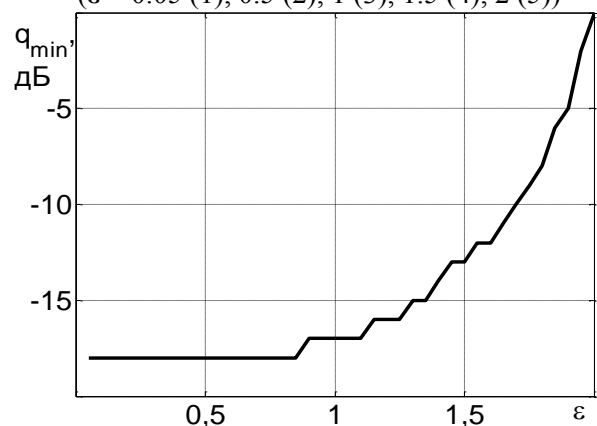


Рис. 7. Зависимость порогового отношения сигнал/шум от шага сетки

Общее число каналов, согласно (2), можно оценить, зная шаг сетки и пределы изменения параметра  $\Delta\alpha'$ . В простейшем случае можно ограничиться оценкой  $\Delta\alpha'$  как максимального по модулю приращения параметра  $\alpha$  за интервал между измерениями. Введем следующие обозначения: пусть  $\Delta\alpha_i$  – приращение параметра  $\alpha$  за время  $\Delta t$ ,  $\delta\alpha$  – погрешность измерения, а  $\Delta\alpha$  – максимальная разность значений  $\alpha$  в соседние периоды измерения, тогда

Зависимость среднеквадратического отклонения оценки параметра от отношения сигнал/шум представлена на рис. 6. С ростом отношения сигнал/шум погрешность оценивания уменьшается, причем систематическая величина погрешности может быть оценена как  $\delta\alpha/\epsilon \approx 0.41$  и не зависит от шага сетки многоканального коррелятора.

Зависимость, приведенная на рис.6, имеет явно выраженный пороговый характер, в особенности при малых значениях шага сетки. Рассмотрим зависимость порогового отношения сигнал/шум от шага сетки коррелятора (рис.7). Пороговое отношение сигнал/шум увеличивается с ростом шага сетки, причем возрастание начинается с величины  $\epsilon \approx 0.8$ , что согласуется с результатами, приведенными на рис. 5. Совокупность этих данных дает возможность сформулировать следующий вывод: энергетические характеристики многоканального корреляционного приемника сколь угодно мало отличаются от характеристик оптимального приемника полностью известных сигналов при шаге сетки  $\epsilon \leq 0.8$ .

$$\max(\Delta\alpha') = \max|\delta\alpha| + \max|\Delta\alpha_i|. \quad (8)$$

Первое слагаемое в выражении (8) зависит от отношения сигнал/шум (рис. 6), а второе определяется свойствами зависимости  $\alpha(t)$ .

Зависимость величины  $\Delta\alpha'$  от относительной ширины полосы случайного процесса  $\alpha(t)$  приведена на рис.8. Зависимость может быть аппроксимирована аналитической моделью вида

$$\Delta\alpha' = a \cdot \Delta f^b + c.$$

Таким образом, для оценивания необходимого числа каналов параллельного приемника обнаружения нужно учесть пороговое отношение сигнал/шум, при котором планируется реализовать его обнаружение (рис. 6), а также частотные свойства вариаций оцениваемого параметра сигнала (рис. 8).

Число каналов можно оценить по формуле

$$N_k = \left\lceil \frac{\Delta\alpha}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta\alpha'}{\Delta\alpha} \right\rceil, \quad (9)$$

где первый множитель представляет собой формулу (1) (то есть случай полной априорной неопределенности для параметра  $\alpha$ ), а второй множитель учитывает свойства зависимости  $\alpha(t)$  (рис. 8). Число каналов тем меньше, чем уже спектр вариаций  $\alpha(t)$ . В пределе, при  $\alpha = const$ , приходим к одному каналу (случай полностью известного сигнала).

Оценим оптимальное значение  $\Delta f / F_s$ . Очевидно, что при заданных свойствах зависимости  $\alpha(t)$  на это значение можно влиять выбором частоты дискретизации – или, иначе, периода повторения процедуры оценивания параметров. Анализ зависимости на рис.8 приводит к результатам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

$\Delta f / F_s$	$N_k / N_{\max}$	$k$
0,25	0,718	1
0,125	0,541	0,753
0,0625	0,395	0,551

При увеличении периода измерения вдвое, необходимое число каналов увеличивается в 1.33 раза. Время выполнения процедуры обнаружения может быть приблизительно оценено как  $T_0 = T_1 \cdot N_k / m$  [4], где  $T_1$  – время выполнения обнаружения по одному каналу коррелятора, а  $m$  – число параллельных вычислительных блоков системы обработки. Следовательно, характер зависимости времени обнаружения от числа каналов является линейным, и более частое повторение процедуры оценивания параметров не приводит к сокращению общей вычислительной сложности процедуры обнаружения сигналов с частичной априорной параметрической неопределенностью. Таким образом, можно сформулировать следующий вывод: интервал времени между измерениями параметров обнаруживаемого сигнала определяется только требованиями потребителя к темпу выдачи результатов радиотехнической системой.

Рассмотрим производительность вычислительных устройств, применяемых для обнаружения сигналов в многоканальной системе. В качестве вычислителей рассмотрим современные центральные и графические процессоры персональных компьютеров (в дальнейшем будем обозначать их как ЦП и ГП соответственно). Параметры рассмотренных вычислительных устройств приведены в табл. 2 [4, 6].

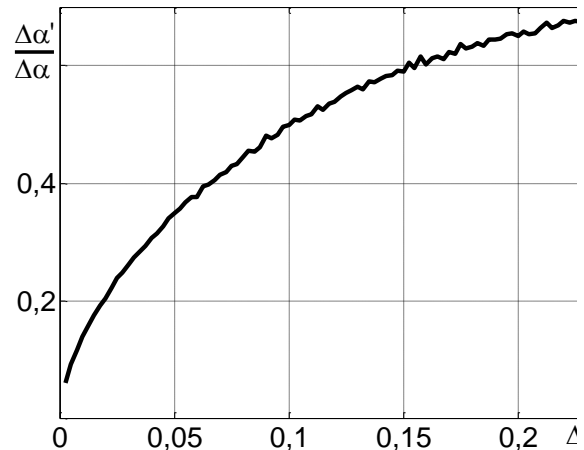


Рис. 8

Таблица 2

Процессор	Число ядер	Тактовая частота, МГц	Пиковая вычислительная мощность, ГФлоп/с	Относительная вычислительная мощность	Объем ОЗУ, Гб	Пиковая пропускная способность ОЗУ, Гб/с	Тип
Intel E2160	2	1600	12.80	0.3	1	4.26	ЦП
Intel E3300	2	2500	20	0.47	4	12.8	ЦП
Intel i3-2100	2*	3100	40.70	0.96	4	21.3	ЦП
Intel Q9400	4	2660	42.56	1	8	17.0	ЦП
GF119	48	1620	155.5	3.65	1	9.6	ГП
G215	96	1340	386	9.06	0.5	54.4	ГП
GF116	192	1200	461	10.8	1	20.8	ГП
GF110	480	1464	1405	33.0	1.25	152	ГП

\*Процессор i3-2100 имеет два вычислительных ядра, но способен одновременно исполнять четыре потока благодаря технологии HyperThreading.

Время выполнения расчетов для одного канала [4] может быть определено как

$$T_1 = \frac{T_k m}{N_k}, \quad (10)$$

где  $T_k$  – время выполнения расчетов для  $N_k$  каналов, а  $m$  – число параллельных вычислительных ядер исполнительного устройства. Результаты оценки (10) приведены в табл. 3. Системы на базе ЦП имеют в среднем более низкое время обработки по единичному каналу, однако существенно меньшее число вычислительных ядер ограничивает их производительность при росте числа параллельных каналов.

При адаптивном управлении числом каналов и шагом сетки многоканального приемника, каждое изменение шага сетки и граничных значений параметров означает повторное формирование всей совокупности опорных сигналов, что тоже требует вычислительных ресурсов. Рассмотрим оценки потерь производительности на формирование опорных сигналов (табл. 4).

Таблица 4

Система	$\overline{T_U / T_0}$
1	9.60
2	9.14
3	9.18
4	8.94
5	1.86
6	1.96
7	2.18
8	1.98

Для систем на базе ЦП (1-4) характерны более заметные затраты времени на формирование опорных сигналов. В связи с этим, для таких систем целесообразно проводить обработку с избыточным числом каналов, с тем, чтобы обновление оценки числа каналов и пересчет опорных колебаний происходил как можно реже.

Таблица 3

Система	$T_1, \text{мс}$
1	0.655
2	0.435
3	0.405
4	0.265
5	1.249
6	0.408
7	1.396
8	0.745

Таблица 5

Система	$\overline{T_0 / T_s}$
5	1.19
6	1.02
7	1.27
8	1.08

Оптимизация программного обеспечения по времени выполнения с использованием разделяемой памяти ГП [6, 7] наиболее эффективна для тех конфигураций, где имеется явно выраженная нехватка полосы пропускания видеопамяти (системы 5, 7). Для систем 6 и 8 выигрыш существенно меньше – в этом случае скорость вычислений в большей степени ограничивается вычислительной мощностью АЛУ, чем потерями времени на доступ в память.

## Выводы

1. Многоканальный приемник обнаружения сигналов с априорно неизвестными параметрами обеспечивает характеристики, сколь угодно близкие к характеристикам приемника полностью известных сигналов, при достаточном числе параллельных каналов.

2. Совмещение процедуры анализа параметров сигнала и процедуры обнаружения позволяет снизить вычислительную сложность процедуры обнаружения сигнала в условиях частичной априорной неопределенности, за счет сужения диапазона значений неизвестных параметров и соответственного уменьшения числа каналов.

3. Процедура обнаружения сигналов в многоканальной системе может быть существенно ускорена за счет применения параллельных вычислительных устройств – многоядерных универсальных процессоров, графических процессоров или вычислителей на базе современных цифровых процессоров обработки сигналов и программируемых логических матриц. При этом универсальные процессоры обеспечивают вполне приемлемые характеристики производительности для числа параллельных каналов, не превышающего нескольких десятков. В этих же условиях, графические процессоры не полностью раскрывают свой потенциал из-за неполной загрузки вычислительных блоков.

4. Применение параллельной обработки дает возможность реализовать значительное число параллельных каналов, что позволяет работать с сигналами с несколькими неизвестными параметрами. Это позволяет существенно повысить темп выдачи результатов и повысить вероятность правильного обнаружения, в том числе при действии помех.

5. Во многих случаях имеет смысл проводить расчеты с избыточным числом каналов, чтобы не пересчитывать заново опорные сигналы. Это особенно критично при реализации системы обработки на базе универсальных процессоров с малым числом вычислительных ядер.

*Данная работа проводилась в рамках программы NVIDIA Academic Partnership, и автор хотел бы выразить признательность корпорации NVIDIA и лично Антону Джораеву за предоставленное оборудование (видеокарты GeForce GTS450). Автор также благодарит коллег за возможность тестирования разработанного программного обеспечения на видеокартах GeForce GT240 и GTX570.*

**Список литературы:** 1. *Обнаружение радиосигналов* / П.С.Акимов и др.; под ред. А.А.Колосова. – М. : Радио и связь, 1989. – 224с. 2. *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. 3. *Теоретические основы радиолокации* : учеб. пособие для вузов / под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов.радио, 1970. – 560 с. 4. *Литвин-Попович, А.И.* Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах // Радиотехника. – 2011. – Вып. 166. – С. 165-172. 5. *Литвин-Попович, А.И.* Обнаружение сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности // Радиотехника. – 2012. – Вып. 168. – С. 16-21. 6. *Информационные материалы Nvidia* [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nvidia.com/object/personal-supercomputing.html>. 7. *E. Alerstam, T. Svensson & S. Andersson-Engels.* Parallel computing with graphics processing units for high speed Monte Carlo simulation of photon migration // J. Biomedical Optics 13, 060504 (2008).

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 12.09.2012*