

Литвин-Попович А. И.

# ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ В СЛЕДЯЩИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В работе рассмотрены методы обработки сигналов в следящих радиотехнических системах. Использование адаптивно-формируемой сетки параметров и априорных данных о результатах предыдущих сеансов измерения позволяет получить характеристики, сравнимые с характеристиками многоканальной параллельной системы обработки, при меньших затратах вычислительных ресурсов. Оценки характеристик и вычислительных затрат проведены методом имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** радиотехнические системы, обнаружение радиосигналов, следящие системы обработки сигналов.

## 1. Введение

Задачи обнаружения сигналов и измерения их параметров являются базовыми и часто встречаются при разработке радиотехнических систем извлечения и передачи информации [1–8]. Для случая полностью известных параметров сигнала задача обнаружения решена и детально описана в литературе, однако случай полностью известного сигнала является идеализацией и фактически не встречается в реальной аппаратуре. В реальности параметры сигнала не точно соответствуют заданным при расчете, что вызвано частичной априорной неопределенностью в отношении параметров принимаемых и обрабатываемых сигналов, а также дрейфом параметров радиоэлектронных устройств и их элементов. При этом точностные и вероятностные характеристики получаемых оценок параметров оказываются занижены по сравнению с ожидаемыми [9, 10]. В условиях априорно неизвестных параметров сигнала предпочтительными являются многоканальные системы обработки, а также системы, адаптирующиеся к изменениям свойств сигнала и помех.

## 2. Постановка задачи

Имеется сигнал  $x(t, \alpha)$ , наблюдаемый на фоне белого шума  $n(t)$ , а также аддитивных и мультипликативных помех  $c_a(t)$  и  $c_m(t)$ :

$$s(t, \alpha) = x(t, \alpha) \cdot c_m(t) + c_a(t) + n(t). \quad (1)$$

Параметры  $\alpha$  сигнала  $x(t, \alpha)$  неизвестны априорно. Известно, что значения параметров могут лежать в диапазоне  $\alpha_i \in [\alpha_{i, \min} \dots \alpha_{i, \max}]$ , а также есть информация о наличии корреляции между значениями  $\alpha_i$  в разные моменты времени. Требуется решить задачу обнаружения такого сигнала и измерения априорно неизвестного параметра  $\alpha$  по реализации  $s(t, \alpha)$ .

Введем следующие обозначения: пусть  $\alpha'$  — оценка параметра  $\alpha$ ,  $e'$  — оценка энергии сигнала,  $\zeta = \alpha - \alpha'$  — ошибка оценки параметра  $\alpha$ . Ошибка оценки является случайной величиной, потому не может непосредственно

служить метрикой погрешности. В качестве метрики могут использоваться функции от  $\zeta$ , дающие статистически устойчивые результаты — среднее значение ошибки оценки, средний модуль, среднеквадратическое отклонение оценки от истинного значения параметра и так далее.

Обычный метод решения задачи обнаружения и измерения параметров сигнала предусматривает вычисление некоторой целевой функции для набора значений априорно неизвестных параметров  $\hat{\alpha}$  сигнала  $s$ .

$$\hat{\phi} = f_1(s, \hat{\alpha}), \quad (2)$$

$$e' = f_2(\hat{\phi}), \quad (3)$$

$$\alpha' = g(\hat{\phi}). \quad (4)$$

В зависимости от вида сигнала и от неизвестных параметров  $\alpha$ , целевая функция  $f_1$  (2), метрика  $f_2$  (3) и функция оценки параметров  $g$  (4) будут изменяться. Так, в случае применения многоканального коррелятора [2, 9, 10] эти выражения примут вид

$$\hat{\phi} = \int_T s(t) \cdot s_0(t, \hat{\alpha}) dt, \quad e' = \max(\hat{\phi}) \quad \text{и} \quad \alpha' = \arg \max(\hat{\phi}),$$

а для методов, основанных на вычислении невязки модельного сигнала с анализируемым сигналом или его спектром —

$$\hat{\phi} = \int_T (s(t) - s_0(t, \hat{\alpha}))^2 dt, \quad e' = \min(\hat{\phi}) \quad \text{и} \quad \alpha' = \arg \min(\hat{\phi}) \quad [1, 2].$$

В первом случае, физический смысл метрики (3) — максимальное значение корреляционного интеграла, во втором случае — минимальная невязка параметризации.

Вычисление целевой функции (2) для всего множества  $\hat{\alpha}$  требует значительных вычислительных ресурсов. В то же время, такие вычислительные задачи хорошо масштабируются в параллельных вычислительных системах, поскольку вычисления (2) могут производиться независимо для всех аргументов из множества  $\hat{\alpha}$  [9–13]. Альтернативный вариант решения этой задачи, использующий адаптивное формирование сетки опорных сигналов по данным предыдущего сеанса оценивания параметра [10, 14] обеспечивает существенно

меньшие затраты вычислительных ресурсов и более удобен в системах, имеющих единственное вычислительное устройство (например, один универсальный процессор).

Более оперативное решение задачи обнаружения и измерения параметров сигнала возможно с помощью следящих систем. В таких системах оценка параметров сигнала может проводиться рекуррентно, постепенно уточняясь, и используется обычно небольшое число каналов, что позволяет снизить требования к вычислительной системе, осуществляющей процедуры обработки сигналов. Кроме того, как и в случае многоканальных систем с адаптивным формированием сетки каналов, снижение времени получения оценок может быть достигнуто использованием априорной информации — данных предыдущего оценивания — в предположении о наличии статистической связи между значениями оценок неизвестного параметра сигнала в разные моменты времени. Для прогнозирования изменений неизвестного параметра от времени могут использоваться различные модели — в частности, модели линейного предсказания [11].

В общем случае схему устройства обнаружения сигналов и измерения их неизвестных параметров можно изобразить в виде, приведенном на рис. 1. Здесь,  $d'$  — индикатор обнаружения сигнала,  $e'$  — метрика (3). Введем также следующие обозначения:  $\varepsilon$  — шаг сетки параметров,  $\xi$  — ширина главного лепестка целевой функции по измеряемому параметру,  $q$  — отношение сигнал/шум.

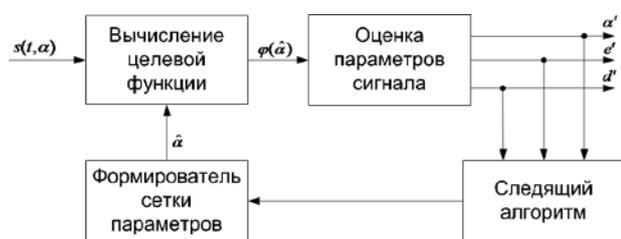


Рис. 1. Общая схема реализации процедуры оценивания параметров сигнала

В простейшем случае сетка по неизвестному параметру  $\alpha$  эквидистантная и стационарная, в пределах возможных значений параметра. Под стационарной сеткой параметров понимается совокупность значений параметров  $\alpha = \{\alpha_{\min}, \alpha_{\min} + \varepsilon, \alpha_{\min} + 2\varepsilon, \dots, \alpha_{\max}\}$ , сформированная один раз и не адаптирующаяся к изменениям свойств обрабатываемого сигнала [9].

Схему оценивания параметров со стационарной эквидистантной сеткой в дальнейшем будем обозначать, как «схему 1». Эквидистантная сетка обеспечивает постоянство вероятности правильного обнаружения и погрешности оценок в пределах возможного диапазона значений неизвестного параметра сигнала. Вместе с тем, при условии наличия статистической связи между значениями параметра сигнала в отдельных сеансах измерения, такая сетка обеспечивает избыточный объем информации о сигнале. Рассмотренную в работе [10] модификацию этой схемы обозначим в дальнейшем как «схему 2». Особенностью этой схемы является повторное формирование сетки параметров после каждого сеанса оценивания параметров сигнала, на основе модели линейного предсказания.

Рассмотрим также возможную модификацию схемы 2, заключающуюся во введении поэтапного уточнения оценок неизвестного параметра сигнала. При этом сетка опорных сигналов формируется для каждой итерации процедуры оценивания. Такую схему обозначим в работе, как «схему 3».

Таким образом, различия в рассматриваемых в данной работе схемах сводятся к методике определения параметров опорных сигналов в каналах:

1. **Схема 1.**  $N$  каналов, эквидистантная стационарная сетка по неизвестному параметру  $\alpha$ , в пределах возможных значений параметра  $\alpha$ .

2. **Схема 2.**  $M$  каналов, эквидистантная сетка по неизвестному параметру  $\alpha$ , центрированная относительно априорной оценки этого параметра, полученной методом предсказания вперед по предыдущим оценкам. Шаг сетки и число каналов определяется исходя из требуемых вероятностных и точностных характеристик оценки, и постоянны в рамках конкретной системы.

3. **Схема 3.**  $K$  каналов, эквидистантная сетка по неизвестному параметру  $\alpha$ , сетка центрирована относительно априорной оценки величины неизвестного параметра, оценка проводится многократно с повторным формированием сетки, причем сетка в каждой итерации уточняется. При сохранении числа каналов это означает сокращение интервала значений  $\alpha$ , в пределах которого проводится оценивание, и соответственное уменьшение шага сетки  $\varepsilon$ .

Задачи данного исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Сравнительный анализ точности оценок параметров сигнала, получаемых тремя рассматриваемыми схемами, и сопутствующих затрат вычислительных ресурсов на измерение.

2. Сравнительный анализ характеристик обнаружения, получаемых тремя рассматриваемыми схемами.

### 3. Представление результатов

Для всех рассматриваемых схем обнаружения и измерения параметров сигналов характерно проведение измерений в узлах некоторой сетки параметров. Шаг этой сетки определяет статистические характеристики оценок и характеристики обнаружения. Вопрос об обосновании шага сетки рассматривался в работах [9, 10]. Первым фактором, который нужно учитывать при определении шага, является допустимая величина потерь энергии сигнала. Эту величину можно получить из характеристик обнаружения [9]. Вторым фактором при определении шага сетки является допустимая величина погрешностей оценивания параметра. На рис. 2 приведена зависимость погрешности измерения параметра для схемы 1 от шага сетки, при нескольких фиксированных значениях отношения сигнал/шум. Зависимость получена для случая прямоугольного радиопульса с априорно неизвестной частотой заполнения.

С увеличением шага сетки, погрешность возрастает линейно до определенного предела, различного для разных отношений сигнал/шум. При  $q \gg 1$ , погрешность можно оценить как

$$\sigma(\alpha) = c \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где величина  $c$  при равномерном законе распределения параметра  $\alpha$  сходится к значению  $1/\sqrt{12}$  с ростом размера имитационной выборки.

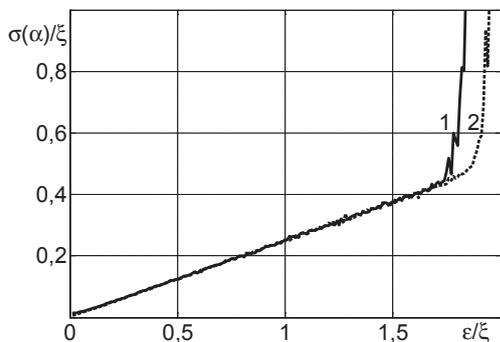


Рис. 2. Зависимость погрешности оценивания  $\sigma(\alpha)/\xi$  от шага сетки  $\epsilon/\xi$ : 1 —  $q = -3$  дБ; 2 —  $q = 3$  дБ

На рис. 3 приведена зависимость погрешности от отношения сигнал/шум при различном шаге сетки. При этом величина погрешности нормирована к шагу сетки, и с ростом отношения сигнал/шум все зависимости асимптотически стремятся к значению  $1/\sqrt{12}$ .

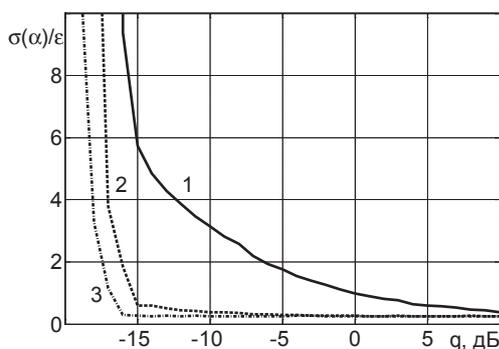


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности оценивания  $\sigma(\alpha)/\epsilon$  от отношения сигнал/шум  $q$ : 1 —  $\epsilon = 0,01$ ; 2 —  $\epsilon = 0,05$ ; 3 —  $\epsilon = 0,5$

Из рис. 2 и 3 и выражения (1) можно сделать следующий вывод: шаг сетки можно оценить исходя из требуемой погрешности по следующей формуле:

$$\epsilon = \frac{\sigma(\alpha)}{c}. \tag{2}$$

Таким образом, определены критерии выбора шага сетки в системах со статической (формируемой один раз) сеткой. Для систем с динамической сеткой, помимо шага сетки необходимо оценивать и пределы значений неизвестного параметра. Наличие априорной информации о параметрах сигнала позволяет сузить сетку по сравнению со статическим вариантом [10].

В работах [10, 14] в качестве априорного значения неизвестного параметра использовалась последняя оценка, полученная в предыдущем сеансе наблюдения, т. е.

$$\alpha''(t) = \alpha'(t-1). \tag{3}$$

При этом для реальных сигналов приращение сигнала за интервал времени между наблюдениями является конечным. Таким образом, ошибка такой априорной оценки не превышает  $\Delta\alpha$  — максимально возможного приращения значения параметра между измерениями. В то же время возможна ситуация, когда единственное ошибочное измерение породит цепочку последующих промахов. Рассмотрим использование моделей линейного

предсказания для прогнозирования изменений параметра сигнала [11]. При этом априорное значение параметра  $\alpha$  в момент времени  $t$  можно оценить как

$$\alpha''(t) = \sum_{i=1}^p \alpha'(t-i) \cdot \beta_i, \tag{4}$$

где  $p$  — порядок модели, а значения коэффициентов  $\beta_i$  могут быть определены по имеющейся истории наблюдений параметров  $\alpha$  сигнала. При использовании модели линейного предсказания (4) влияние каждого из предыдущих результатов оценивания на априорное значение  $\alpha''$  меньше, чем в случае (3), следовательно повышается устойчивость оценок. Рассмотрим применение моделей линейного предсказания на исходных данных, полученных при обработке рассеянных сигналов в РЛС вертикального зондирования. В работе [14] приведены статистические характеристики вариаций скорости ветра. С использованием модели вариаций скорости ветра [14] получены оценки оптимального порядка модели  $p$  (4) и ошибки предсказания  $\gamma = |\alpha - \alpha''|$ . Оптимальный порядок модели равен 5, а результаты моделирования сведены в табл. 1. Применение линейного предсказания позволяет снизить область поиска в 2...3 раза для рассмотренного примера, что способствует снижению систематических погрешностей или позволяет уменьшить число точек сетки и снизить вычислительную сложность процедур обработки сигналов.

Таблица 1

Результаты моделирования

$P, \%$	50	75	90	95	99	99,9	100
$\Delta v/\Delta v_{\max}$	0,001	0,019	0,027	0,033	0,044	0,057	0,121
$\gamma$	0,003	0,006	0,009	0,012	0,018	0,027	0,041

Для систем с адаптивной сеткой с переменным шагом («схема 3» в данной работе) помимо шага сетки на величину погрешностей оценивания влияет еще два фактора: число итераций последовательного уточнения оценок  $k$  и коэффициент сужения сетки  $\gamma$ , задающий скорость сходимости процесса адаптации. Увеличение коэффициента  $\gamma$  и рост числа итераций  $k$  до определенного предела должен ускорять адаптацию и снижать величину систематической погрешности оценивания. При этом случайная (флуктуационная) погрешность определяется отношением сигнал-шум и ограничивает эффективность итерационного процесса измерения.

На рис. 4 приведена зависимость погрешности оценивания параметра от шага сетки для адаптивной системы с последовательным уточнением оценок (кривые 1...7 соответствуют 1...7 итерациям), построенная для  $q = 3$  дБ. С ростом числа итераций, погрешность для систем с большим шагом сетки снижается более быстро. При малом шаге сетки влияние последовательного уточнения оказывается незначительным.

Для итерации  $k$  можно записать:  $\Delta\alpha_k = \Delta\alpha_{k-1}/\gamma$ ,  $\epsilon_k = \epsilon_{k-1}/\gamma$ ,  $\alpha_{i,k} = \alpha'_{k-1} - \left(\frac{\Delta\alpha_k}{2} + i \cdot \epsilon_j\right)$ , где  $\alpha'_{k-1}$  — априорная оценка параметра  $\alpha$  на  $k-1$ -м шаге. Исходя из (1), погрешность оценивания параметра  $\alpha$  на  $k$ -м шаге можно оценить как  $\sigma_k(\alpha) = c \cdot \epsilon_k$ . Учитывая (2), окончательно запишем:

$$\sigma_k(\alpha) = \frac{c \cdot \varepsilon_1}{\gamma^k} \quad (5)$$

Выражение (5) дает оценку систематической погрешности оценок, и не учитывает случайную составляющую погрешности, возрастающую с уменьшением отношения сигнал/шум. На рис. 5 построены зависимости погрешности от числа итераций для фиксированного шага сетки,  $\gamma = 2$  и отношения сигнал/шум  $-3$  дБ (кривая 1),  $0$  дБ (2),  $3$  дБ (3) и  $6$  дБ (4). Кривая 5 отмечает теоретическую зависимость систематической погрешности от номера итерации. Величины погрешности на рис. 5 нормированы к значению погрешности единичной оценки. С увеличением отношения сигнал/шум, величина получаемых погрешностей снижается, и появляется дополнительный эффект от увеличения числа итераций.

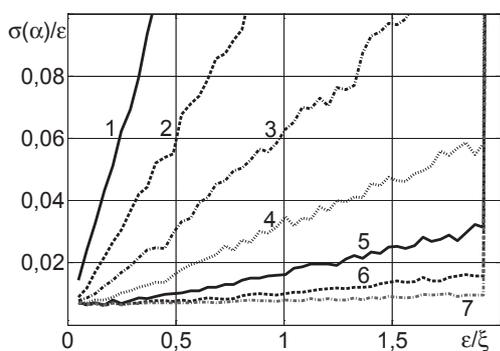


Рис. 4. Зависимость погрешности  $\sigma(\alpha)/\varepsilon$  от шага сетки  $\varepsilon/\xi$  в адаптивной системе оценивания

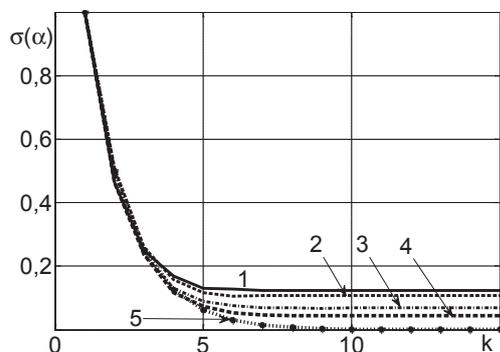


Рис. 5. Зависимость погрешности  $\sigma(\alpha)$  от числа итераций оценивания  $k$  для  $\varepsilon = 0,4$

В то же время, при более низких отношениях сигнал/шум величина погрешности стабилизируется уже при 5...6 итерациях и больше не уменьшается. Поскольку каждая итерация процесса оценивания сопряжена с использованием вычислительных ресурсов, то целесообразно останавливать процесс по достижении стабильного уровня погрешности. Вместе с тем, в процессе обработки сигналов нет возможности оценить погрешность измерения параметров сигнала — хотя бы потому, что эти параметры обрабатываемого сигнала неизвестны априорно. Таким образом, при многократном (итерационном) решении задачи обнаружения или оценивания параметров адаптивными системами возникает дополнительный вопрос о критериях остановки процесса адаптации. Таким критерием может служить приращение оценки энергии за итерацию:

$$\partial E(j) = E_j - E_{j-1} \quad (6)$$

Зависимость (6) можно использовать в качестве опорной при оценке вероятности правильного обнаружения в адаптивной измерительной системе. Однако имея набор оценок энергии в последовательных итерациях процесса обнаружения-измерения, можно также отслеживать изменение оценки от текущей итерации к следующей, и останавливать процесс, когда приращение снизится до заданной величины. Таким образом, критерий остановки процесса адаптации можно записать в следующем виде:

$$\partial E \leq \min(\Delta E_O, \Delta E_M) \quad (7)$$

то есть для остановки процесса приращение должно снизиться до меньшего из двух допустимых приращений — по критерию вероятности правильного обнаружения ( $\Delta E_O$ , [9]) и по критерию допустимой погрешности измерения ( $\Delta E_M$ ). Зависимость, связывающая приращение погрешностей измерения и приращение оценки энергии, приведена на рис. 6. Она построена методом имитационного моделирования для случая прямоугольного радиоимпульса на фоне нормального белого шума.

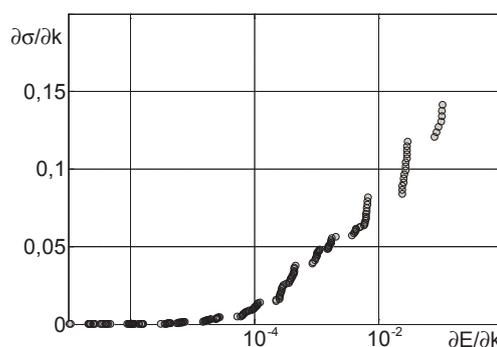


Рис. 6. Зависимость погрешности оценивания  $\partial\sigma/\partial k$  от потерь энергии сигнала  $\partial E/\partial k$

Число итераций влияет также и на вероятность правильного обнаружения сигнала. На рис. 7 приведены зависимости потерь вероятности правильного обнаружения от числа итераций для трех значений отношения сигнал/шум:  $-6$  дБ (кривая 1),  $-3$  дБ (2),  $3$  дБ (3). С ростом отношения сигнал/шум, эффект от дополнительных итераций процедуры обработки сигнала уменьшается.

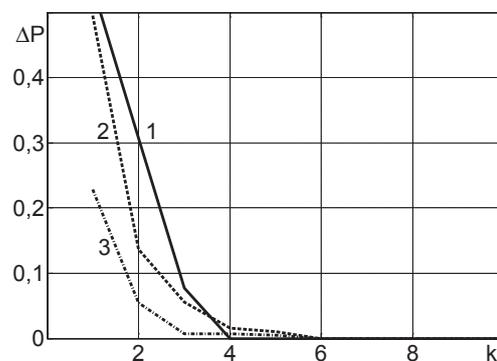


Рис. 7. Зависимость потерь вероятности  $\Delta P$  от номера итерации обнаружения  $k$

Сопоставим вычислительную эффективность однократного и итерационного методов решения задачи

обнаружения и измерения параметров сигнала. Для этого зафиксируем требуемую величину погрешности оценивания при заданном отношении сигнал/шум. На рис. 8 приведены зависимости времени получения оценки в схеме 3 с 2...8 итерациями последовательного уточнения оценок (кривые 1...7, соотв.). Время оценки нормировано к результату, полученному в схеме 1. С ростом числа итераций минимальное время оценивания уменьшается, причем выигрыш максимален при жестких требованиях к максимальной погрешности оценки.

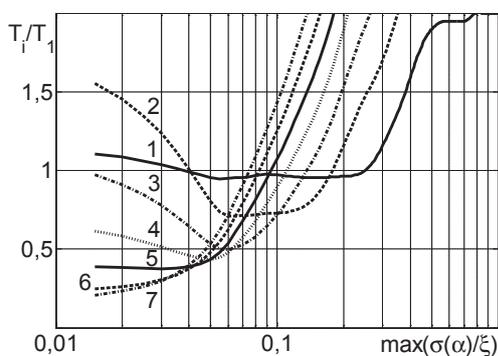


Рис. 8. Зависимость времени оценивания  $T_i/T_1$  от допустимой погрешности  $\max(\sigma(\alpha)/\xi)$  для 2...8 итераций (кривые 1...7 соответственно)

В то же время, в ситуациях, когда допустима большая величина погрешности, наиболее предпочтительна схема с однократным оцениванием параметра сигнала.

#### 4. Выводы

Следящие системы измерения параметров сигнала обеспечивают более высокую вычислительную эффективность при жестких требованиях к точности получаемых оценок. Дополнительным преимуществом следящих систем является возможность быстрого получения грубых оценок неизвестных параметров сигнала, а также возможность гибкого управления вычислительным процессом в зависимости от требуемых в данный момент точностных и вероятностных характеристик оценок. Это позволяет более эффективно использовать имеющиеся вычислительные ресурсы системы обработки сигналов.

Наиболее эффективны следящие системы в ситуациях с широким диапазоном изменения неизвестного параметра.

#### Литература

1. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. — М.: Радио и связь, 2004. — 608 с.
2. Фалькович, С. Е. Оценка параметров сигнала [Текст] / С. Е. Фалькович. — М.: Сов. Радио, 1970. — 336 с.
3. Акимов, П. С. Обнаружение радиосигналов [Текст] / П. С. Акимов и др.; под ред. А. А. Колосова. — М.: Радио и связь, 1989. — 224 с.
4. Теоретические основы радиолокации [Текст] : учеб. пособие для вузов / под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Сов.радио, 1970. — 560 с.
5. Nathanson, F. E. Radar design principles — signal processing and environment [Text] / F. E. Nathanson, J. P. Reilly, M. N. Cohen. — NJ: SciTech, 1999. — 724 p.
6. Meikle, H. Modern radar systems [Text] / H. Meikle. — Boston: Artech House, 2001. — 581 p. — ISBN 1-58053-294-2.
7. Basseville, M. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application [Text] / M. Basseville, I. Nikiforov. — Prentice-Hall, 1993. — 469 p.
8. Purdy, R. J. Radar signal processing [Text] / Robert J. Purdy et. al. // Lincoln Laboratory Journal. — 2000. — Vol. 12, № 2. — pp. 297–320.
9. Литвин-Попович, А. И. Обнаружение сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности [Текст] / А. И. Литвин-Попович // Радиотехника. — 2012. — Вып. 168. — С. 16–21.
10. Литвин-Попович, А. И. Обнаружение и измерение параметров сигналов в параллельных системах обработки [Текст] / А. И. Литвин-Попович // Радиотехника. — X.: ХНУРЭ, 2012. — Вып. 170. — С. 125–131.
11. Lyons, R. G. Understanding digital signal processing [Text] / Richard G. Lyons. — Prentice-Hall, 2001. — ISBN 0-201-63467-8.
12. Литвин-Попович, А. И. Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах [Текст] / А. И. Литвин-Попович // Радиотехника. — X.: ХНУРЭ, 2011. — Вып. 166. — С. 165–172.
13. NVIDIA® Tesla® GPU Accelerators [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/ URL: <http://www.nvidia.com/object/personal-supercomputing.html>
14. Литвин-Попович, А. И. Использование априорной информации при обработке сигналов в метеорологических РЛС [Текст] / А. И. Литвин-Попович, С. Р. Шекин // Технологический аудит и резервы производства. — 2013. — Т. 3, № 1(11). — С. 24–28.

#### ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ В СЛІДКУЮЧИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

В роботі розглянуто методи обробки сигналів в слідкуючих радіотехнічних системах. Використання адаптивно-формованої сітки параметрів та априорних даних про результати попередніх вимірів дозволяє отримати характеристики, порівнянні з характеристиками багатоканальних систем паралельної обробки, при менших затратах обчислювальних ресурсів. Оцінки характеристик та обчислювальних затрат отримані методом імітаційного моделювання.

**Ключові слова:** радіотехнічні системи, виявлення радіосигналів, слідкуючі системи обробки сигналів.

*Литвин-Попович Андрей Игоревич, кандидат технических наук, доцент, кафедра радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, e-mail: andrey\_res@ukr.net.*

*Литвин-Попович Андрій Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.*

*Lytvyn-Popovych Andrii, Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine, e-mail: andrey\_res@ukr.net*