

## К-ЭТАПНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ С ПОСТОЯННЫМ УРОВНЕМ ЛОЖНЫХ ТРЕВОГ

Гаврилов К.Ю.

Московский государственный авиационный институт  
(технический университет)  
125871, Москва, Волоколамское шоссе 4, МАИ  
тел.: (095) 158-68-00, факс: (095) 158-29-77, e-mail: [aet@tk.mainet.msk.su](mailto:aet@tk.mainet.msk.su)

В  $k$ -этапных обнаружителях сигналов [1], являющихся обобщением усеченных последовательных процедур обнаружения, множество отсчетов наблюдаемого процесса разбивается на группы (этапы наблюдения), число  $k$  ( $k > 1$ ) и размеры которых определяются спецификой конкретной задачи. Преимущества  $k$ -этапных обнаружителей по сравнению с обнаружителями с фиксированным временем наблюдения (иначе говоря, одноэтапными обнаружителями) определяются выигрышем в среднем времени наблюдения при тех же показателях качества обнаружения – вероятности ложной тревоги (ВЛТ) и вероятности правильного обнаружения (ВПО). Во многих практических задачах обнаружения (в частности, в радиолокации) величина выигрыша может быть весьма существенной (от 2 до 8 раз), что делает привлекательным использование  $k$ -этапных обнаружителей в различных радиотехнических системах.

Одним из важнейших условий практического использования процедур обнаружения в радиотехнических системах (особенно в радиолокационных) является обеспечение постоянного уровня ложных тревог (ПУЛТ) при априорной неопределенности относительно шумов и помех. Общий подход к разработке  $k$ -этапных обнаружителей сигналов с ПУЛТ-режимом в условиях параметрической априорной неопределенности изложен в [2], где также проведен анализ  $k$ -этапных обнаружителей некогерентных пачек радиоимпульсов с ПУЛТ-режимом в многоканальной по дальности радиолокационной системе (РЛС). Однако  $k$ -этапные процедуры с ПУЛТ-режимом могут быть использованы и для обнаружения когерентных пачек радиоимпульсов. Исследование таких обнаружителей, включающее их анализ и расчет показателей эффективности, является целью настоящей работы.

В  $k$ -этапном обнаружителе отсчеты наблюдений разбиваются на  $k$  групп по  $n^{(j)}$  отсчетов в каждой,  $j=1, \dots, k$ . Общее число отсчетов  $n_k \leq n_{\max}$ , где  $n_j = \sum_{i=1}^j n^{(i)}$ ;  $n_{\max}$  – максимально допустимое число отсчетов. Для обозначения факта наличия ( $i=1$ ) или отсутствия ( $i=0$ ) полезного сигнала вводится индикаторная переменная  $\vartheta = i$ . В конце каждого этапа от 1-го до  $(k-1)$ -го выносятся заключительные решения  $d_i$  о значении параметра  $\vartheta = i$  и наблюдения прекращаются, либо выносятся решение  $d_c$  о проведении следующего этапа наблюдения. После проведения  $k$ -го этапа возможно принятие только заключительного решения, наблюдения прекращаются. Принятие решений  $\{d_c, d_0, d_1\}$  осуществляется путем сравнения решающей статистики  $L_{n_j}$  с двумя порогами  $A_j > B_j$  на этапах  $j=1, \dots, k-1$  и с одним порогом  $C$  на последнем  $k$ -ом этапе. Полезный сигнал наблюдается на фоне шумов и помех неизвестной мощности  $P_{\Pi}$ . В [2] показано, что в условиях гауссовских помех при  $k$ -этапном обнаружении с ПУЛТ-режимом значения порогов  $A_j, B_j, C$  должны быть адаптивными:

$$A_j = \hat{P}_{\Pi j} T_{A_j} A_j^*, \quad B_j = \hat{P}_{\Pi j} T_{B_j} B_j^*, \quad C = \hat{P}_{\Pi k} T_C C^*, \quad (1)$$

где  $A_j^*, B_j^*, C^*$  – оптимальные значения порогов  $k$ -этапной процедуры обнаружения при нормированном (единичном) значении мощности помехи  $P_{\Pi}$ ;  $\hat{P}_{\Pi j}$  – оценка мощности помехи на  $j$ -ом этапе,  $j=1, \dots, k$ ;  $T_{A_j}, T_{B_j}, T_C$  – масштабные коэффициенты, зависящие от заданного значения ВЛТ  $P_F^{(0)}$  и от точности оценок мощности помехи  $\hat{P}_{\Pi j}$  на этапах  $j=1, \dots, k$ .

Реализация ПУЛТ-режима в многоканальной по дальности РЛС обеспечивается путем оценки неизвестной мощности помехи в “скользящем окне”, в центре которого находится анализируемый канал (ячейка дальности) [3]. При этом для оценки мощности помехи могут быть использованы различные вычислительные алгоритмы, определяющие вид ПУЛТ-процессора. В настоящей работе использован УС-ПУЛТ-процессор, в котором оценка мощности помехи

получается путем усреднения значений мощности помех по всем каналам “скользящего окна”, размером  $m_0$  ( $m_0$  - четное число).

В случае обнаружения когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой в  $k$ -этапном обнаружителе может быть использована фильтровая и фильтрационно-корреляционная обработка [1,4]. При этом используемая в дальнейшей обработке решающая статистика  $L_n$  формируется на выходе блока фильтрации пачки импульсов (БФПИ). Из общих соотношений [2] следует, что в этом случае структурная схема  $k$ -этапного обнаружителя когерентной пачки импульсов с УС-ПУЛТ-процессором может быть представлена в виде рис. 1.

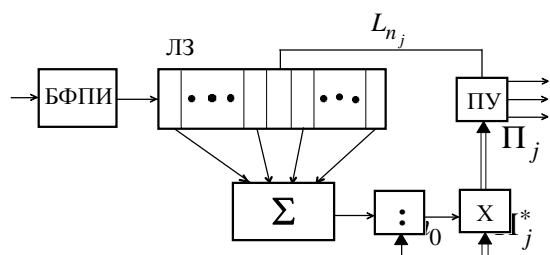


Рис. 1. Структурная схема  $k$ -этапного ПУЛТ-обнаружителя с адаптивными порогами.

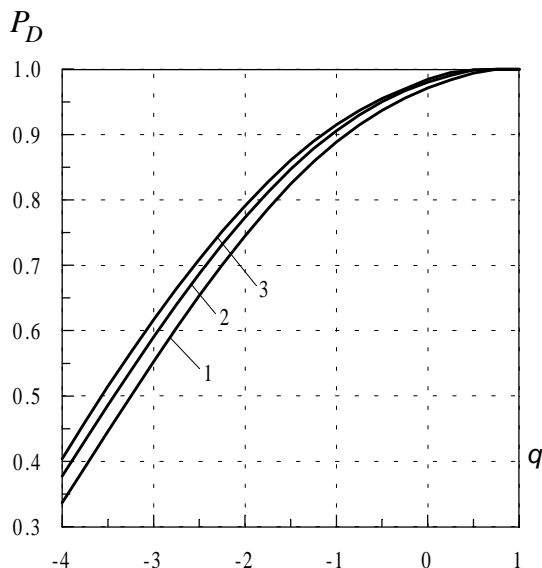


Рис. 2. Характеристики обнаружения  $k$ -этапного ПУЛТ-обнаружителя.

На рисунке обозначено:  $\Pi_j^* = (T_{A_j}A_j^*, T_{B_j}B_j^*, T_C C^*)$ ,  $\Pi_j = (A_j, B_j, C)$  - значения порогов; ЛЗ – линия задержки с  $m_0$  отводами и временем запаздывания между соседними отводами, равным длительности импульса; ПУ – пороговое устройство.

В случае однородной (в пределах “окна”) гауссовской помехи с независимыми между соседними каналами дальности значениями схема рис. 1 обеспечивает заданный уровень ложных тревог при соответствующем выборе масштабных коэффициентов  $T_{A_j}, T_{B_j}$  ( $j = 1, \dots, k-1$ ) и  $T_C$ .

Значения оптимальных порогов  $\Pi_j^*$  (вместе с масштабными коэффициентами) рассчитывались согласно общей методике расчета параметров  $k$ -этапных обнаружителей [5] при условно-экстремальном критерии минимума среднего числа отсчетов (СЧО)  $\bar{n}_0 = \mathbf{M}[n_j | \vartheta = 0]$ . При расчете порогов задавались ограничения на значения ВЛТ  $P_F = \mathbf{P}(d_1 | \vartheta = 0)$ , ВПО  $P_D = \mathbf{P}(d_1 | \vartheta = 1)$  и максимального числа импульсов  $n_{\max}$ . Анализ работы  $k$ -этапного ПУЛТ-обнаружителя когерентной пачки импульсов в условиях однородных помех проводился путем расчета его показателей качества – значений ВЛТ, ВПО и условных СЧО  $\bar{n}_i = \mathbf{M}[n_j | \vartheta = i]$ ,  $i = 0, 1$ . Проведен расчет характеристик обнаружения  $k$ -этапного обнаружителя ( $k=4$ )  $P_D = P_D(q)$ , где  $q$  – отношение сигнал-помеха для одного импульса. На рис. 2 представлены характеристики обнаружения  $k$ -этапного обнаружителя, рассчитанные при значениях  $P_F^{(0)} = 10^{-4}$ ,  $n_{\max} = 10$  и  $m_0 = 8, 16, 32$  (кривые 1, 2, 3 соответственно). Расчет порогов проводился при заданном значении ВПО  $P_D^{(0)} = 0.9$ . С ростом размеров “окна” характеристики обнаружения сдвигаются влево. Для  $k$ -этапного ( $k > 1$ ) и одноэтапного ( $k=1$ ) обнаружителей характеристики обнаружения в условиях однородных помех практически совпадают.

Оценка эффективности  $k$ -этапного обнаружителя с ПУЛТ-режимом проводилась путем расчета показателя эффективности  $\mu_0 = N / \bar{n}_0$  [2], определяющего выигрыш по СЧО  $\bar{n}_0$   $k$ -этапного обнаружителя по сравнению с одноэтапным с числом импульсов  $N$ . Значения  $\mu_0$ , рассчитанные при

значениях  $P_F^{(0)} = 10^{-4}$ ,  $P_D^{(0)} = 0.9$  и  $N = n_{\max} = 10$  представлены в таблице. Там же представлены значения  $\mu_0$   $k$ -этапного обнаружителя некогерентной пачки импульсов при тех же значениях исходных данных (результаты расчетов из [2]). Как видно из таблицы, при обнаружении когерентной пачки импульсов эффективность оказывается ниже, чем для некогерентной пачки. Однако эффективность  $k$ -этапного обнаружителя остается достаточно высокой и  $\mu_0 > 2.8$ . Существенный рост эффективности  $\mu_0$  наблюдается при уменьшении заданного значения ВЛТ.

Таблица 1.

| $\mu_0$             | $m_0 = 8$ | $m_0 = 16$ | $m_0 = 32$ |
|---------------------|-----------|------------|------------|
| Когерентная пачка   | 3.25      | 2.90       | 2.84       |
| Некогерентная пачка | 4.00      | 3.93       | 3.87       |

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ (грант Т00-2.4-497).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Сосулин Ю.Г., Гаврилов К.Ю. *К-этапное обнаружение сигналов*. // Радиотехника и электроника, 1998, том 43, № 7, с. 835-850.
2. Сосулин Ю.Г., Гаврилов К.Ю. *К-этапное обнаружение сигналов с постоянным уровнем ложных тревог при параметрической неопределенности*. // Радиотехника и электроника, 2001, том 46, № 7, с. 839-848.
3. Бакулев П.А., Басистов Ю.А., Тугуши В.Г. *Обработка сигналов с постоянным уровнем ложных тревог*. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1989, том 32, № 4, с. 4-15.
4. Сосулин Ю.Г. *Теоретические основы радиолокации и радионавигации*. М.: Радио и связь, 1992.
5. Sosulin Yu.G., Gavrilov K.Yu. *K-Stage Procedures of Testing Statistical Hypotheses*. // Pattern Recognition and Image Analysis, 1996, v. 6, № 4, p. 662-674.



K-STAGE DETECTION OF COHERENT SIGNALS WITH CONSTANT FALSE ALARM RATE

Gavrilov K.

Moscow State Aviation Institute (Technical University)  
Volokolamskoe sh. 4, Moscow, 125871 Russia  
phone: (095) 158-13-73, fax: (095) 158-29-77, e-mail: [aet@tk.mainet.msk.su](mailto:aet@tk.mainet.msk.su)

In  $k$ -stage signal detectors [1] that are generalization of truncated sequential detection procedures, a set of samples of the observing process is split into groups (stages of observation). Number of groups  $k$  ( $k > 1$ ) and size of each one is defined by peculiarities of the specific problem. Advantages of  $k$ -stage detectors versus the detectors with fixed time of observation (in other words, one-stage detectors) are determined by the gain in average sample number for the same quality performances of detection, namely, false alarm probability (FAP) and detection probability (DP). For many real detection problems (in particular, for radar engineering) the gain value may be very essential (from 2 to 8 times) that makes attractive the use of  $k$ -stage detectors in various radiotechnical systems.

One of the most important condition of practical application of the detection procedures to radiotechnical systems (especially, to radars) is ensuring the constant false alarm rate (CFAR) in prior uncertainty concerning noise and clutters. The general approach to development of  $k$ -stage signal detectors with CFAR mode was described in [2]. The purpose of the present paper is an investigation of  $k$ -stage CFAR detectors for coherent pulse trains.

$K$ -stage CFAR detectors use adaptive thresholds, the values of which depend on clutter power estimates at stages  $j = 1, \dots, k$ . Implementation of CFAR mode is provided by means of estimation of unknown clutter power in "a sliding window", where the channel (range cell) to be analyzed is center of the window. Herewith the threshold values together with the scale coefficients are calculated according to the general method of  $k$ -stage detectors parameter computation [3] for conditional-extremum criterion of average sample number minimum. An analysis of  $k$ -stage detector functionality is performed for the case when as CFAR processor we take YC CFAR processor, where the estimate of clutter power is obtained by averaging the clutter powers in all channels of "the sliding window" having size  $m_0$  [4]. Computation of  $k$ -stage procedure detection curves for number of stages  $k = 4$ , FAP value  $P_F^{(0)} = 10^{-4}$ , number of pulses  $n_{max} = 10$  and  $m_0 = 8; 16; 32$  was performed. The results of computation of efficiency factor  $\mu_0$  that characterizes the gain in average pulse number of  $k$ -stage procedure in comparison with one-stage ( $k = 1$ ) detector (i.e. the detector with fixed pulse train size) are also presented. It is shown that the values  $\mu_0 = 2 \dots 6$  are growing with decrease of "window" size  $m_0$  and FAP  $P_F^{(0)}$ . Herewith the values themselves are less than in case of non-coherent pulse train detection.

This work was executed under support of Russian Ministry of Education (project no. TOO-2.4-497)

REFERENCE

1. Sosulin Yu.G., Gavrilov K.Yu. *K-Stage Signal Detection*. // Journal of Communications Technology and Electronics, 1998, v. 43, No. 7, p. 776-790.
2. Sosulin Yu.G., Gavrilov K.Yu. *K-etapnoe obnaruzhenie signalov c postojannim urovnem lojnih trevog pri parametricheskoj neopredelennosti*. // Radiotekhnika i electronica, 2001, v. 46, No. 7, p. 839-848.
3. Bakulev P.A., Basistov Yu. A., Tuguschi V.G. *Obrabotka signalov s postojannim urovnem lojnih trevog*. // Izvestija vuzov. Radioelektronika, 1989, v. 32, No. 4, p. 4-15.
4. Sosulin Yu.G. *Teoreticheskie osnovi radiolokazii i radionavigazii*. –Moskva: Radio i svjaz, 1992.
5. Sosulin Yu.G., Gavrilov K.Yu. *K-Stage Procedures of Testing Statistical Hypotheses*. // Pattern Recognition and Image Analysis, 1996, v. 6, No. 4, p. 662-674.