

ОБЩИЙ МЕТОД АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР ПОИСКА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ И НАПРАВЛЕННЫХ ГРАФОВ

Зинчук В.М., Капаева Т.Ф., Лимарев А.Е., Свиридова Е.В.

ФГУП Воронежский НИИ связи,
394018, Воронеж, Плехановская 14, тел.(0732) 52-58-22

Широкий класс радиотехнических систем радиолокации [1], радионавигации [2], радиосвязи [3-5] и др., на первых этапах работы функционируют как поисковые системы обнаружения. На этом этапе необходимо обнаружить факт наличия сигнала и осуществить оценку его параметров (частоты несущей, времени прихода (задержки), направления прихода и др.) с точностью до ширины полосы захвата следящими устройствами, осуществляющими точную оценку параметров и слежение за ними в процессе обработки информации.

Для расчета показателей эффективности и статистических характеристик циклических процедур поиска используется метод производящих функций и преобразований Лапласа для направленного (ориентированного) вероятностного графа, описывающего поведение системы поиска. Для получения производящей функции использован простой, наглядный и очень эффективный метод направленных графов, развитый Ховардом [6] при анализе стохастических систем, моделируемых полумарковскими процессами с конечным числом состояний.

Рассматривается задача анализа показателей эффективности циклических процедур поиска и обнаружения полезных сигналов $S(t, \square)$ на фоне помех в ограниченной области \square априорно неизвестных параметров $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n) \in \Omega \subset \mathbf{R}^n$, $t \geq 0$, применительно к системам радиолокации, радиосвязи, радионавигации и др. Поисковое пространство \square - априорная область неопределенности параметров сигнала, в таких процедурах, как известно [4], разбивается на

конечное число $m \geq 1$ прямоугольных областей (ячеек) \square_j , $j = \overline{1, m}$, $\Omega = \bigcup_{j=1}^m \Omega_j$, $\Omega_j \cap \Omega_k = \emptyset$ при

$j \neq k$, $j, k \in \{1, \dots, m\}$, которые образуют дискретные пространства поиска $\Omega^{(m)} = \{\Omega_j\}_{j=1}^m$. Ячейки

$\Omega_i \in \Omega^{(m)}$ поочередно просматриваются (анализируются) в определенном порядке. На анализ каждой ячейки выделяется ограниченный ресурс времени $T_A > 0$. На каждом шаге обзора $\Omega^{(m)}$ производится анализ ячейки по некоторому, регулярному в смысле Гренандера, алгоритму обнаружения [7]. При этом с вероятностью \square возможно ложное обнаружение (ложная тревога) при анализе m_1 ячеек не содержащих сигнал. При анализе ячейки, содержащей сигнал, с вероятностью \square происходит пропуск сигнала, а с вероятностью $1 - \square$ - правильное обнаружение [8, 9].

Время анализа $\square > 0$, затрачиваемое на одном шаге обзора $\Omega^{(m)}$, зависит от вида алгоритма обнаружения и в общем случае оно случайно

$\square \in [T_0, T_A]$, T_0 - минимальное время анализа на одном шаге поиска. Поиск прекращается, если при анализе какой-либо k -ой ячейки, $k \in \{1, \dots, m\}$, принимается решение о наличии в ячейке сигнала $S(t, \square)$, т.е. $\theta \in \Omega_k$, $k \in \{1, \dots, m\}$. Если же сигнал не был обнаружен в течение одного цикла обзора $\Omega^{(m)}$, то поиск возобновляется на втором цикле и т.д. [8 - 13].

Устройство поиска, в обобщенном виде показанное на рис. 1, осуществляет при этом поочередный просмотр ячеек путем перестройки коррелятора-обнаружителя, на который подается опорный сигнал, сдвинутый на величину τ_k , что соответствует k -ой просматриваемой ячейке.



Рис.1.

Выше была приведена простейшая стратегия так называемого циклического поиска. В настоящее время существует большое число модификаций циклических процедур поиска. На рис.2, следуя Джовановичу [14], приведены некоторые наиболее характерные процедуры просмотра анализируемого пространства времени. Как следует из обобщенной схемы устройства поиска, рис.1, стратегии перестройки сигнала определяют схему управления стратегией поиска, а обнаружитель коррелятор начального этапа и обнаружитель контрольного этапа органически входят в эту схему. Вид этих обнаружителей и их структура определяются, с одной стороны, рассматриваемым каналом передачи информации, а с другой стороны, требованиями к эффективности всех стратегий поиска. Классифицировать все обнаружители можно как показано на рис.3.

Практически во всех работах, посвященных поиску (захвату) в системах с расширенным спектром [4, 5, 14–16], считалось, что после предварительного этапа обнаружения (одного или нескольких) существует контрольный этап (см. рис. 1), на котором безошибочно подтверждается принятое решение. Далее такой этап будем называть **идеальным** контрольным этапом. В реальных радиотехнических системах обнаружение всегда осуществляется с конечными, отличными от нуля вероятностями ошибок, то есть фактически систем с идеальным контрольным этапом не существует. Будем называть контрольный этап, на котором существуют ненулевые вероятности ошибок, **реальным** контрольным этапом.

В данной работе рассмотрена обобщенная система поиска (рис. 1) как с реальным, так и с идеальным контрольным этапом, в которой могут использоваться любые алгоритмы обнаружения, указанные на рис. 3.

1. Анализ показателей эффективности циклических процедур поиска с реальным контрольным этапом.

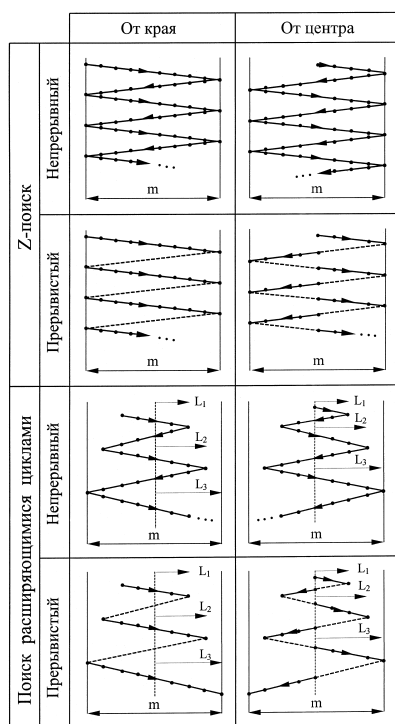


Рис. 2.

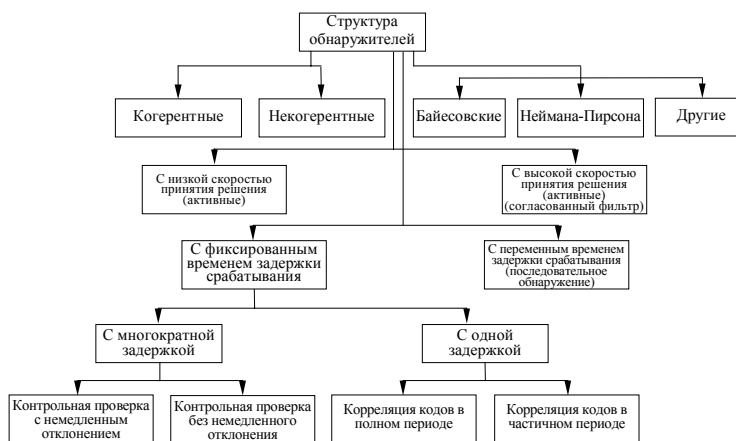


Рис. 3.

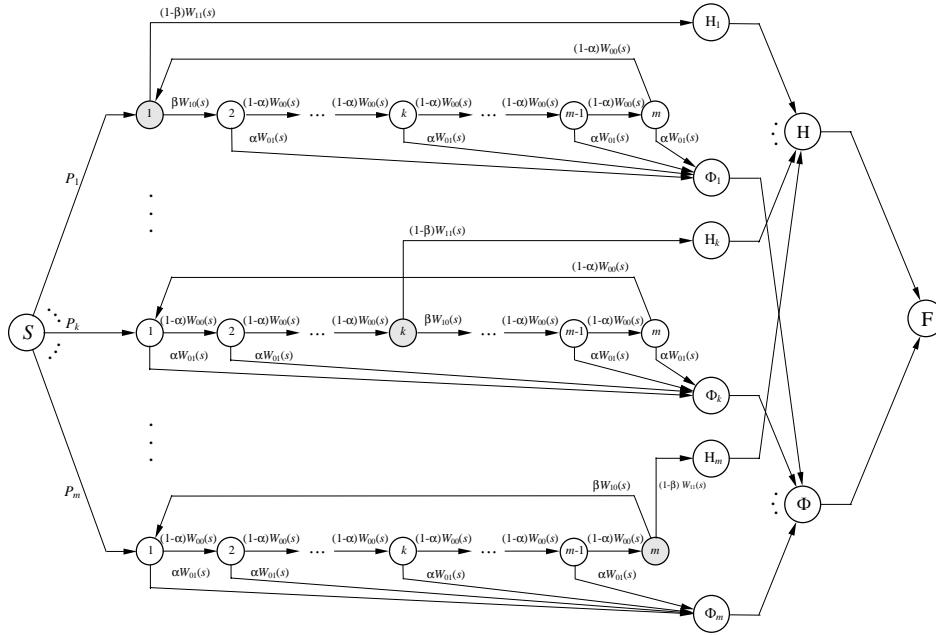


Рис.4.

За показатели надежности при гипотезе H_1 - о наличии сигнала $S(t, \square)$ в анализируемом пространстве $\square \in \Omega^{(m)}$, - приняты вероятности $P_{\text{ОБ}}$ правильного и $P_{\text{Е}}$ ошибочного окончания поиска; при гипотезе H_0 - об отсутствии сигнала в $\Omega^{(m)}$, - вероятности ложных тревог $P_{\text{ЛТ}}$. Поисковые усилия отождествляются со средним $t_{\text{П}}$ и дисперсией $D_{\text{П}}$ времени окончания поиска, а также со средними условными временами поиска $\bar{t}_{\text{П|ОБ}} = \mathbf{E}\{t_{\text{П}} | \text{ОБ}\}$, $\bar{t}_{\text{П|Е}} = \mathbf{E}\{t_{\text{П}} | \text{Е}\}$ при условии правильного и ошибочного обнаружения соответственно, и условными дисперсиями $D_{\text{П|ОБ}} = \mathbf{D}\{t_{\text{П}} | \text{ОБ}\}$, $D_{\text{П|Е}} = \mathbf{D}\{t_{\text{П}} | \text{Е}\}$ времени поиска при правильном "ОБ" и ошибочном "Е" обнаружении.

Направленный граф, описывающий функционирование системы поиска с реальным контрольным этапом (рис. 1), изображен на рис. 4.

Применяя теорему Мэсона [17] и правила преобразования ориентированных (направленных) графов [4], получены, передаточные функции $H(s)$ и $\Phi(s)$ графа, рис.4, при переходе в поглощающие состояния H и Φ .

Используя свойства преобразования Лапласа и теорию производящих функций [18], непосредственно через $H(s)$ и $\Phi(s)$ получены аналитические выражения для описанных выше числовых и вероятностных характеристик системы поиска:

$$P_{\text{ОБ}} = H(s)|_{s=0} = \frac{1-\beta}{1-\beta(1-\alpha)^{m-1}} \sum_{k=1}^m P_k (1-\alpha)^{k-1}; \quad (1)$$

$$P_{\text{Е}} = 1 - P_{\text{ОБ}} = \Phi(s)|_{s=0}; \quad (2)$$

$$\bar{t}_{\text{П}} = \frac{\bar{\tau}_0}{\alpha} - \frac{(1-\beta)\bar{\tau}_0 - \alpha\bar{\tau}_1}{\alpha(1-\beta(1-\alpha)^{m-1})} \sum_{k=1}^m P_k (1-\alpha)^{k-1}; \quad (3)$$

$$\bar{t}_{\text{П|ОБ}} = \left\{ \frac{1-\beta}{1-\beta(1-\alpha)^{m-1}} \left[\left(\bar{\tau}_{11} + \frac{\beta(1-\alpha)^{m-1} [\bar{\tau}_{10} + (m-1)\bar{\tau}_{00}]}{1-\beta(1-\alpha)^{m-1}} \right) \sum_{k=1}^m P_k (1-\alpha)^{k-1} + \bar{\tau}_{00} \sum_{k=1}^m (k-1) P_k (1-\alpha)^{k-1} \right] \right\} / P_{\text{ОБ}}; \quad (4)$$

$$\bar{t}_{\text{П|Е}} = [\bar{t}_{\text{П}} - \bar{t}_{\text{П|ОБ}} P_{\text{ОБ}}] / P_{\text{Е}}; \quad (5)$$

$$D_{\Pi} = \frac{2\bar{\tau}_0[(1-\alpha)\bar{\tau}_{00} - \alpha\bar{\tau}_{01}]}{\alpha^2} + \frac{E_0(\tau^2)}{\alpha} - \frac{2\bar{\tau}_{00}[(1-\beta)\bar{\tau}_0 - \alpha\bar{\tau}_1]}{\alpha[1-\beta(1-\alpha)^{m-1}]} \sum_{k=1}^m P_k (1-\alpha)^{k-1} (k-1) -$$

$$- \left[\frac{\bar{\tau}_0}{\alpha} - \bar{t}_{\Pi} \right] \left[\frac{2\beta(1-\alpha)^{m-1}[\bar{\tau}_{10} + (m-1)\bar{\tau}_{00}]}{1-\beta(1-\alpha)^{m-1}} + \frac{(1-\beta)E_0(\tau^2) - \alpha E_1(\tau^2)}{(1-\beta)\bar{\tau}_0 - \alpha\bar{\tau}_1} + \right.$$

$$\left. + \frac{2\bar{\tau}_0(1-\beta)(\bar{\tau}_{11} - \bar{\tau}_{01})}{(1-\beta)\bar{\tau}_0 - \alpha\bar{\tau}_1} \right] - \left[\frac{\bar{\tau}_0}{\alpha} - \bar{t}_{\Pi} \right]; \quad (6)$$

$$D_{\Pi|OB} = E[t_{\Pi|OB}^2] - \bar{t}_{\Pi|OB}^2 = \left. \frac{d^2 H(s)}{ds^2} \right|_{s=0} - \bar{t}_{\Pi|OB}^2; \quad (7)$$

$$D_{\Pi|E} = E[t_{\Pi|E}^2] - \bar{t}_{\Pi|E}^2 = \left. \frac{d^2 \Phi(s)}{ds^2} \right|_{s=0} - \bar{t}_{\Pi|E}^2. \quad (8)$$

2. Анализ показателей эффективности циклических процедур поиска с идеальным контрольным этапом.

Направленный граф, описывающий функционирование системы поиска с идеальным контрольным этапом (рис. 1), изображен на рис. 5. Заметим, что поиск в данном случае может закончиться только правильным обнаружением. t_{Π} - случайное время окончания поиска, D_{Π} - дисперсия времени окончания поиска.

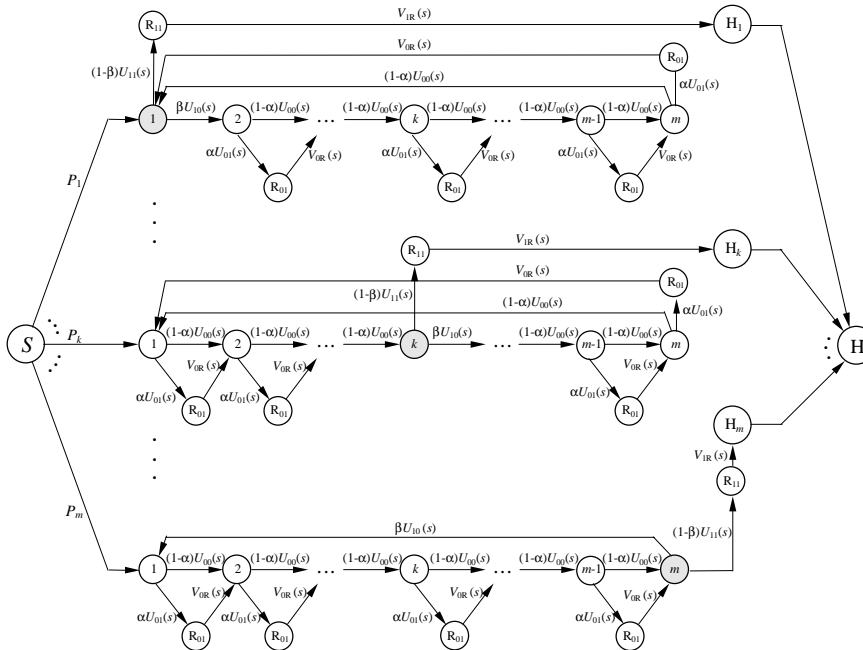


Рис.5.

Используя свойства преобразования Лапласа и теорию производящих функций [18], непосредственно через производящую функцию $H(s)$ получены среднее \bar{t}_{Π} и дисперсия D_{Π} времени окончания поиска:

$$\bar{t}_{\Pi} = \frac{\bar{\tau}_1 + (1-\beta)\bar{\tau}_{1R}}{1-\beta} + (\bar{\tau}_0 + \alpha\bar{\tau}_{0R}) \left[\frac{\beta(m-1)}{1-\beta} + \sum_{k=1}^m P_k (k-1) \right]; \quad (9)$$

$$D_{\Pi} = \frac{D_1(\tau) + (1-\beta)D_{1R}(\tau)}{1-\beta} + \{D_0(\tau) + \alpha[D_{0R}(\tau) + (1-\alpha)\bar{\tau}_{0R}(\bar{\tau}_{0R} + 2(\bar{\tau}_{01} - \bar{\tau}_{00}))]\} \times$$

$$\times \left[\frac{\beta(m-1)}{1-\beta} + \sum_{k=1}^m (k-1)P_k \right] + (\bar{\tau}_0 + \alpha\bar{\tau}_{0R})^2 \left[\sum_{k=1}^m (k-1)^2 P_k + \left(\sum_{k=1}^m (k-1)P_k \right)^2 \right] +$$

$$+ \frac{\beta}{(1-\beta)^2} [(m-1)(\bar{\tau}_0 + \alpha\bar{\tau}_{0R}) + \bar{\tau}_{10}]^2 - \beta(\bar{\tau}_{11} - \bar{\tau}_{10})^2. \quad (10)$$

Для задачи радиолокации, радиоразведки [19] очень важными характеристиками являются функция плотности времени окончания поиска и интегральная функция распределения времени поиска. Для поиска с идеальным контрольным этапом в работе приведен общий вид плотности распределения $g(t_{\Pi})$ и функции распределения времени поиска $G(t_{\Pi})$, которую можно получить, используя обратное преобразование Лапласа [18].

$$G(t_{\Pi}) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{m-1} \sum_{h=0}^{i(m-1)+l} P_j C_{i(m-1)+l}^h \beta(1-\beta) \alpha^{i(m-1)+l} (1-\alpha)^h \times$$

$$\times L^{-1} \left\{ \frac{\exp\{-s(2T_1 + (T_1 + T_2)(i(m-1) + l + 1))\}}{s} \right\}. \quad (11)$$

Полученные выражения использовались в численных расчетах для различных моделей каналов, сигналов и помех применительно к системам радиолокации, радиосвязи и радионавигации [1 - 3]. В качестве примера приведены графики зависимости описанных выше показателей качества процедур поиска с реальным и идеальным контрольным этапом от отношения сигнал/шум $q^2 = \mathcal{E}_s / N_0$ - отношения энергии сигнала \mathcal{E}_s к спектральной плотности помехи N_0 . Рассмотрен случай когерентного обнаружения.

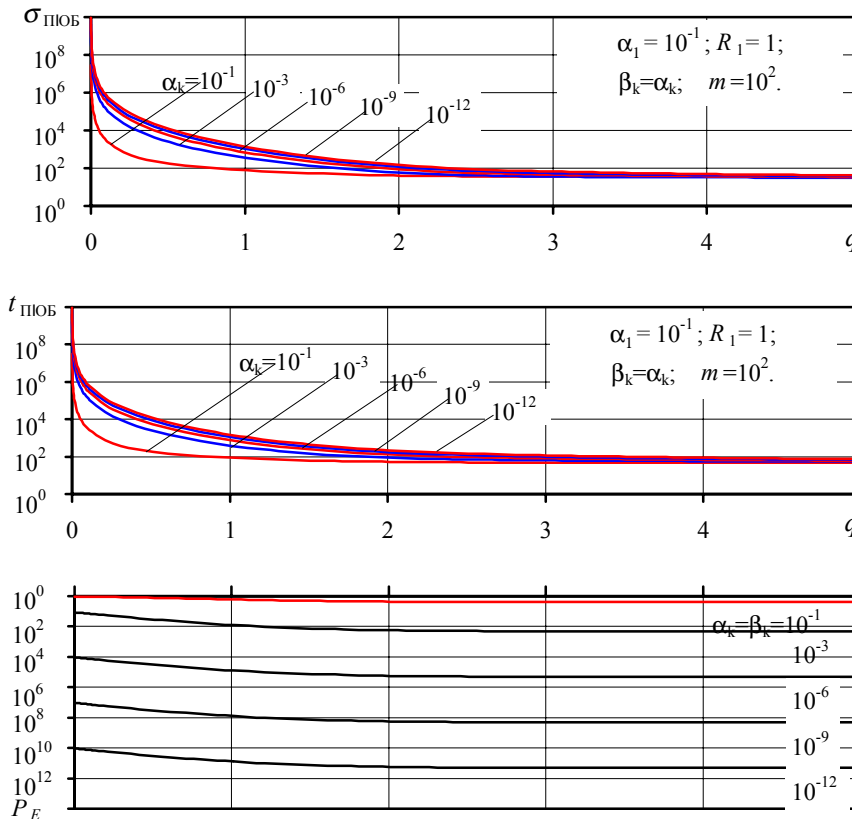


Рис. 6.

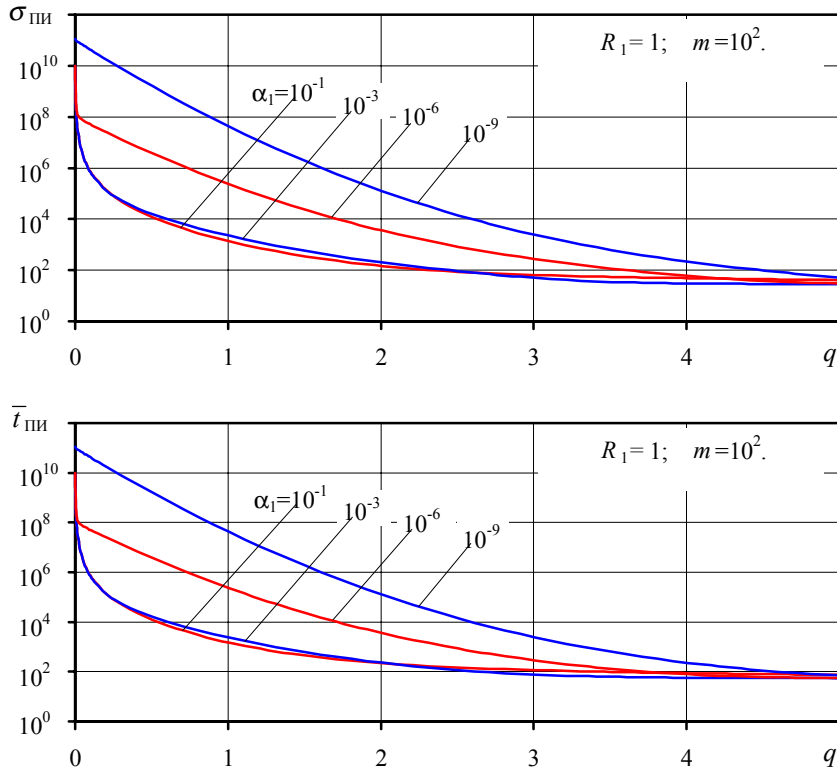


Рис.7

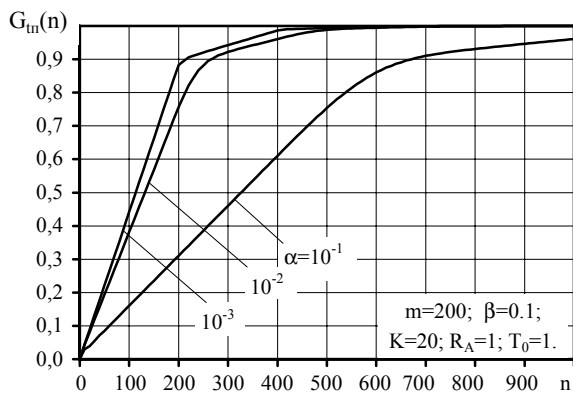


Рис. 8.

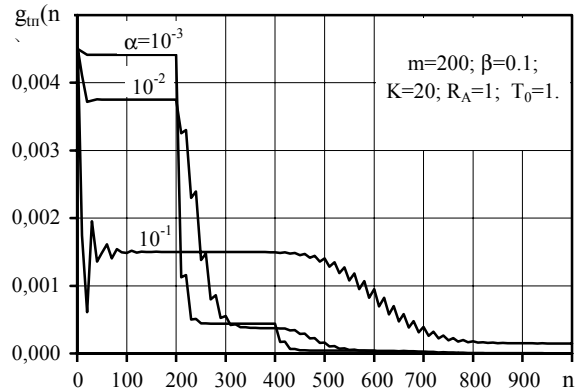


Рис. 9.

Список литературы

1. Вопросы статистической теории радиолокации. Т. 1. /Под ред. Г.П. Тартаковского. -М.: Сов. радио, 1963. - 424 с.
2. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах. / Под ред. Ю. М. Казаринова. - М.: Сов. радио, 1975. - 296 с.
3. Алексеев А.И., Шереметьев А.Г., Тузов Г.И. и др. Теория и применение псевдослучайных сигналов. - М.: Наука, 1969.
4. Holmes J. K. Coherent Spread Spectrum Systems. - N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1982 - 624 p.
5. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R.A., Levitt B.K. Spread Spectrum Communications. Vol. 1. – Rockville, Maryland: Computer Science Press, Inc., 1985. – XVII+402p. Vol. 2. – 358p. Vol. 3. – XIX+423p.
6. Howard R. A. System Analysis of Semi-Markov Processes. - IEEE Trans. Military Electron. Systems, 1964, v. MIL-8, № 2, pp. 114 - 124
7. Зинчук В. М. Показатели эффективности циклических процедур поиска с параллельно-поочередными алгоритмами обзора и случайным временем анализа на каждом шаге. - Техника средств связи. Серия: Техника радиосвязи, 1979, Вып. 4 (21), с. 15 - 23.
8. Stone L. D. Theory of Optimal Search.- N.Y.: Academic Press, Inc., 1975. 260 p.
9. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска: Пер. с англ. - М.: Наука, 1985. - 248 с.
10. Pollock S. M. Search Detection and Subsequent Action: Some Problems on the Interfaces. - Operation Research, 1971, v. 19, № 3, pp. 359 - 386.
11. Enslow P. H. A Bibliography of Search Theory and Reconnaissance Theory Literature. - Naval Research Logistics Quarterly, 1966, v. 13, № 2, pp. 177 - 203.
12. Dobbie J.M. A survey search theory // Operation Research.-1968.-v.16, № 3, pp. 457 - 708.
13. Альсведе Р., Вегенер И. Задачи поиска: Пер. с нем. - М.: Мир, 1982. - 368 с.
14. Vladan M. Jovanovic Analysis of Strategies for Serial-Search Spread-Spectrum Code Acquisition-Direct Approach. – IEEE Trans. Com., 1988, v. COM-36, № 11, pp. 1208 - 1220.
15. Polydoros A., Weber C. L. A Unified Approach to Serial Search Spread-Spectrum Code Acquisition. Part I: General Theory. - IEEE Trans. Com., 1984, v. COM-32, № 5, pp. 542 - 549.
16. Polydoros A., Simon M. K. Generalized Serial Search Code Acquisition: The Equivalent Circular State Diagram Approach. - IEEE Trans. Com., 1984, v. COM-32, № 12, pp. 1260 – 1268.
17. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. Пер. с англ. - М.: ИЛ, 1963. - 620 с.
18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.–М.: Наука, 1970. – 720 с.
19. Борисов В. И., Зинчук В. М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно – временной подход. – М.: Радио и Связь, 1999. – 252 с.
20. Moore E. H. A Semi-Markov Processes Model for Secondary Acquisition Systems. - IEEE Trans. Aerosp. Electr. Systems, 1969, v. AES-5, № 1, pp. 33 - 38.
21. Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Инвариантное многоальтернативное обнаружение и различение сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности. - Обзорение прикладной и промышленной математики. Серия "Вероятность и статистика", 1997, т. 4, Вып. 3, с. 344.
22. Журавлев В. И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. - М.: Радио и связь, 1986.- 240с.
23. Авторское свидетельство 915242 СССР. Устройство поиска шумоподобных сигналов/ Зинчук В.М., Щукин Н.И., Борисов В.И. – Приоритет от 18.06.80. Опубликовано 1982. Бюллетень № 11.
24. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Т.2. Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1962.–832 с.



GENERAL METHOD FOR EFFICIENCY ANALYZING CYCLIC SIGNAL SEARCH PROCEDURES ON THE BASIS OF SEMI-MARCOV PROCESSES AND FLOW GRAPHS

Zinchuk V., Kapaeva T., Limarev A., Sviridova E.

Federal Centre State Enterprise «Voronezh Scientific Research Institute of Communication». Plekhanovskaya Str. 14, Voronezh, Russia, 394018, Phone: (0732) 52 58 22.

The problem of efficiency measures analysis of cyclic desired signal $s(t; \theta)$ search and detection procedures in the background of interference within the limited region Ω of a priori unknown parameters $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n) \in \Omega \subset \mathbf{R}^n$, $t \geq 0$, as applied to radar, communication and radionavigation systems is considered. The search space Ω , a priori region of signal parameters uncertainty, as is known [4], has been divided into finite number $m \geq 1$ of rectangular cells \square_j , $j = \overline{1, m}$, $\Omega = \bigcup_{j=1}^m \Omega_j$, $\Omega_j \cap \Omega_k = \emptyset$ for $j \neq k$, $j, k \in \{1, \dots, m\}$ which form discrete search spaces $\Omega^{(m)} = \{\Omega_j\}_{j=1}^m$. The cells $\Omega_i \in \Omega^{(m)}$ are looked over

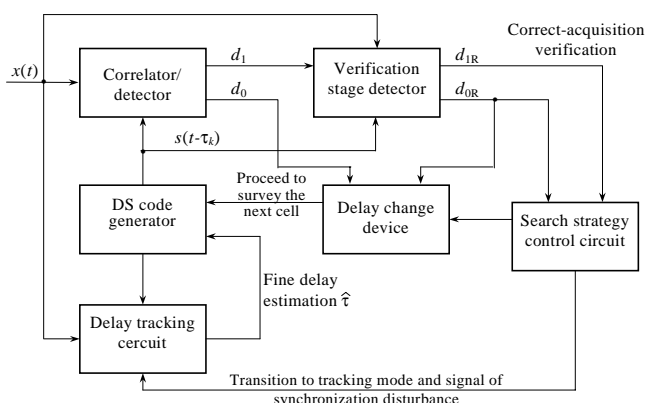


Fig.1.

(analyzed) in turn. A limited time interval $T_A > 0$ is provided for every cell analysis. In each survey step $\Omega_i \in \Omega^{(m)}$ a cell analysis is performed according to a regular Grenander detection algorithm [7]. False alarm with probability α is possible during analyzing $m-1$ cells without signal. In analyzing the signal-contained cell signal missing occurs with probability β and signal detection - with probability $1-\beta$ [8], [9].

Analysis time $\square > 0$ spent in one survey step $\Omega^{(m)}$ depends on detection algorithm, and in general case it is random $\square \in [T_0, T_A]$, T_0 is the minimum analysis time in one search step. The acquisition process terminates when during

analyzing the k -th cell, $k \in \{1, \dots, m\}$, the decision on signal $s(t, \theta)$ presence is made, i.e. $\theta \in \Omega_k$, $k \in \{1, \dots, m\}$. If a signal was not detected during one survey cycle $\Omega^{(m)}$ the search is resumed in the second cycle and so on [8]-[13].

The detector shown in Fig.1 realized serial cells survey via retuning the correlator/detector to which the reference signal shifted by τ_k is applied; this situation corresponds to k -th observable cell.

Practically in all works dedicated to searching (code acquisition) in spread-spectrum system [4], [5], [14]-[16] it was considered that after preliminary detection stage goes verification stage (Fig.1.) where the adopted decision is correctly verified. Further this stage will be referred to as **ideal** verification stage. Detection in practical radio engineering systems is always performed with finite nonzero error probabilities, i.e. actually there is no system with ideal verification stage. We shall call the stage, where nonzero error probabilities are absent, a **real** verification stage.

In this paper the generalized search system (Fig.1.) both with real and ideal verification stages and with various detection algorithms employment is considered.

1. Efficiency Measures Analysis for Cyclic Signal Search Procedures with Real Verification Stage.

Probabilities of correct P_d and erroneous P_E search stopping are taken as reliability measures under hypotheses H_1 about signal $s(t; \theta)$ presence in observable space $\square \in \Omega^{(m)}$; under hypothesis H_0 about signal absence in $\Omega^{(m)}$ false alarm probability P_{FA} is a reliability measure. The search is characterized by mean t_s and variance D_s of search stopping time as well as by mean conditional search times $\bar{t}_{s|d} = \mathbf{E}\{t_s | d\}$, $\bar{t}_{s|E} = \mathbf{E}\{t_s | E\}$ for correct and erroneous detections, respectively, and conditional variances $D_{s|d} = \mathbf{D}\{t_s | d\}$, $D_{s|E} = \mathbf{D}\{t_s | E\}$ of search time under correct "d" and erroneous "E" detection conditions.

The flow graph describing operations of search system with real verification stage was constructed. Graph transfer functions $H(s)$ and $\Phi(s)$ under transition to absorbing states H and Φ were obtained using Mason theorem [17] and flow (oriented) graphs transformation rules [4]. Using Laplace transformation properties and generating function theory [18] we have obtained, through $H(s)$ and $\Phi(s)$, analytical expressions for above-mentioned numerical and probabilistic search system characteristics.

2. Efficiency Measures Analysis for Cyclic Signal Search Procedures with Ideal Verification Stage.

In this case the search may be stopped only with correct detection. t_s is a random search stopping time, D_s is a search stopping time variance.

The flow graph describing operation of search system with ideal verification stage is constructed. Using Laplace transformation properties and generating function theory [18] we have obtained, by means of generating function $H(s)$, mean \bar{t}_s and variance D_s of search stopping time. Probability density function of search stopping time and search time cumulative distribution function are the most important characteristics for radionavigation and radio reconnaissance problems [19]. For the case of searching with ideal verification stage we gave general form of probability density $g(t_s)$ and search time distribution function $G(t_s)$ which may be obtained by inverse Laplace transformation [18].

The obtained expressions have been used in numerical calculations for various models of channels, signals and interference as applied to radar, radio communication and radionavigation systems [1]-[3]. As an example we present diagrams of above-mentioned efficiency measures of search procedures with real and ideal verification stages versus signal-to-noise ratio $q^2 = E_s/N_0$ (ratio of signal energy E_s to noise spectral density N_0). The case of coherent detection is considered.

References

1. Radar Statistical Theory Problems. Vol.1/Under edition of G. P. Tartakovsky. - M.: Sov. Radio, 1963, - pp. 424.
2. Signal Search Detection and Parameter Measurement in Radionavigation Systems /Under edition of Yr. M. Kazarinov. - M.: Sov.Radio, 1975, - pp. 296.
3. A.I. Alekseyev, A.G. Sheremetev, G.I. Tuzov et. al. Pseudorandom Signals Theory and its Application. - M.: Nauka, 1969.
4. J.K. Holmes. Coherent Spread Spectrum Systems. - N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1982 - 624 p.
5. M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, B. K. Levitt. Spread Spectrum Communications. Vol. 1. – Rockville, Maryland: Computer Science Press, Inc., 1985. – XVII+402p. Vol. 2. – 358p. Vol. 3. – XIX+423p.
6. R.A. Howard. System Analysis of Semi-Markov Processes. - IEEE Trans. Military Electron. Systems, 1964, v. MIL-8, № 2, pp. 114 - 124
7. V.M.Zinchuk. Performance Measures of Serial Search Procedures with Parallel-Serial Survey Algorithms and Random Analysis Time at Every Step. – Tekhnika Sredstv Svyazy. Series: Tekhnika Radiosvyazy, 1979, Issue 4(21), pp. 15-23.
8. L.D. Stone. Theory of Optimal Search.- N.Y.: Academic Press, Inc., 1975. 260 p.
9. O. Hellman. An Introduction to Optimum Search Theory: Transl. from English. – M.: Nauka, 1985. – pp. 248.
10. S.M. Pollock. Search Detection and Subsequent Action: Some Problems on the Interfaces. - Operation Research, 1971, v. 19, № 3, pp. 359 - 386.
11. P.H. Enslow. A Bibliography of Search Theory and Reconnaissance Theory Literature. - Naval Research Logistics Quarterly, 1966, v. 13, № 2, pp. 177 - 203.
12. J.M. Dobbie. A survey search theory // Operation Research.-1968.-v.16, № 3, pp. 457 - 708.
13. R. Ahlswede, I. Wegener. Suchprobleme: Transl. from German. – M.: Mir, 1982. – pp. 368.
14. Vladan M. Jovanovic. Analysis of Strategies for Serial-Search Spread-Spectrum Code Acquisition-Direct Approach. – IEEE Trans. Com., 1988, v. COM-36, № 11, pp. 1208 - 1220.
15. A. Polydoros, C.L. Weber A Unified Approach to Serial Search Spread-Spectrum Code Acquisition. Part I: General Theory. - IEEE Trans. Com., 1984, v. COM-32, № 5, pp. 542 - 549.
16. A. Polydoros, M. K. Simon Generalized Serial Search Code Acquisition: The Equivalent Circular State Diagram Approach. - IEEE Trans. Com., 1984, v. COM-32, № 12, pp. 1260 – 1268.
17. S.J. Mason, G. Zimmerman. Electronic Circuits, Signals and Systems. Transl. from English. – M.: IL, 1963. – pp.620.
18. G.A. Korn, T.M. Korn. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. – M.: Nauka, 1970. – pp. 720.
19. V.I. Borisov, V. M. Zinchuk. ECM-Resistance of Radio Communication Systems. Probabilistic-Temporal Approach. – M.: Radio i Svyaz, 1999. – pp. 252.
20. Moore E.H. A Semi-Markov Processes Model for Secondary Acquisition Systems. - IEEE Trans. Aerosp. Electr. Systems, 1969, v. AES-5, № 1, pp. 33 - 38.
21. V.M. Zinchuk, A. Ye. Limarev. Invariant Multialternative Signal Detection and Recognizing under a Priori Uncertainty Conditions. – Review of Applied and Industry Mathematics. Series: Probability and Statistics, 1997, Vol. 4, Number 3, pp. 344.
22. V.I. Zhuravlyov. Search and Synchronization in Spread-Spectrum Systems. – M.: Radio i Svyaz, 1986. – pp. 240.
23. Certificate of Authorship 915242, USSR. Pseudonoise Signal Search Device/ V. M. Zinchuk, N. I. Shchukin, V. I. Borisov. – Priority of 18 june, 1980. Published in 1982. Bulletin № 11.
24. D. Middleton. An Introduction to Statistical Communication Theory. Vol. 2. Transl. from English. - M.: Sov. Radio, 1962, - pp. 832.