

УДК 623.762

Search Capabilities of Helicopters Means Electronic Intelligence to Detect Probing Signal of Aircraft Interception

Yuriy L. Koziratsky* and Roman G. Hilchenko

*Military Education and Research Centre of Military-Air Forces
«Military-Air Academy
Named After Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»
54a Starykh Bolshevikov Str., Voronezh, 394064, Russia*

Received 09.03.2016, received in revised form 11.07.2016, accepted 20.10.2016

A mathematical model of the search helicopter system electronic intelligence radar signal interceptor aircraft using sophisticated scanning trajectory airspace.

Keywords: information conflict, spatial search, probe pulses, scanning of the airspace.

Citation: Koziratsky Yu.L., Hilchenko R.G. Search capabilities of helicopters means electronic intelligence to detect probing signal of aircraft interception, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(8), 1198-1206. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-8-1198-1206.

Поисковые возможности средств радиотехнической разведки вертолета по обнаружению зондирующего сигнала радиолокационной станции авиационного комплекса перехвата

Ю.Л. Козирацкий, Р.Г. Хильченко

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

Разработана математическая модель поиска вертолетной системой радиотехнической разведки сигнала РЛС самолета-перехватчика при использовании последним сложной траектории сканирования воздушного пространства.

Ключевые слова: информационный конфликт, пространственный поиск, зондирующие импульсы, сканирование воздушного пространства.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: urleo@bk.ru

Введение

Как представлено в работах [1, 2], разработка модели вооруженной дуэли «вертолет – авиационный комплекс перехвата» требует детального изучения этапа обнаружения и построения частных моделей, отражающих взаимный поиск участников дуэли.

Анализ особенностей применения истребителей при перехвате воздушных целей [3] показал, что важнейшим режимом многофункциональной радиолокационной станции (МФ РЛС) как составной части авиационного комплекса перехвата (АКП) при решении задач на трассе «воздух – воздух» является режим обзора заданного пространства для определения наличия в нем целей.

В ранее выполненных работах [4, 5] рассматривались процессы поиска с простыми траекториями просмотра сектора поиска. Разработанные модели вполне адекватны подобным процессам поиска для различных фоноцелевых условий. Использование этих моделей показало, что оперативность обнаружения в процессе поиска существенным образом зависит от выбранной траектории, а достоверность принятия решения в процессе поиска определяется фоноцелевыми условиями.

Цель настоящей статьи – разработка модели процесса обнаружения сигналов бортовой РЛС АКП со сложной траекторией просмотра сектора поиска вертолетной системой радиотехнической разведки (РТР).

Исследование процессов поиска целей со сложными траекториями просмотра для выбора рациональных траекторий требует разработки соответствующих моделей. Разработка моделей процесса поиска при сложных траекториях наталкивается на некоторые методические трудности, связанные с неравномерным распределением поисковых усилий (энергетического ресурса) по элементу сектора поиска, например при многократных зондирующих посылках в один элемент сектора.

Особый интерес представляет алгоритм поиска на основе строчно-зигзаговых траекторий (рис. 1), когда строка формируется дискретным перемещением луча диаграммы направленно-

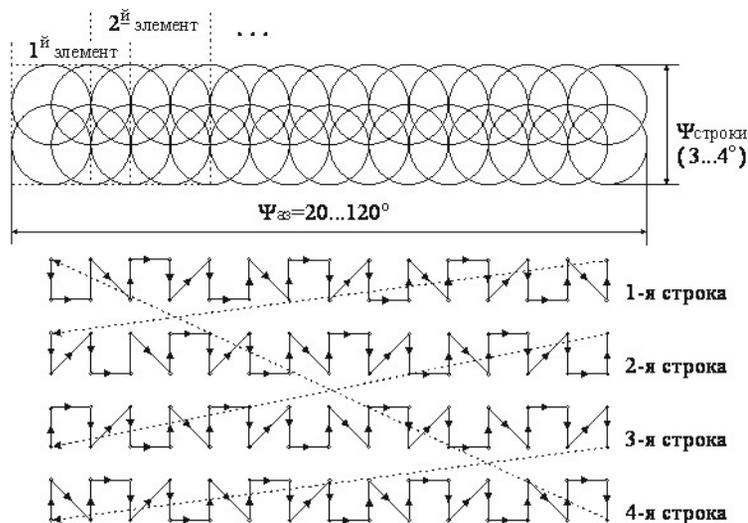


Рис. 1. Закон сканирования луча БРЛС АКП на основе строчно-зигзаговых траекторий

сти (ДН) под углами 90 и 45 градусов. Данный способ сканирования реализуют АКП, оснащенные фазированными антенными решетками (ФАР), при этом в режиме поиска производится дискретное горизонтальное сканирование лучом антенны со смещением по азимуту каждого столбца на 0,5 ширины ДН. После завершения электронного сканирования на одной строке за два шага (вверх – вниз) осуществляется переход к следующей строке, которая располагается со сдвигом по вертикали относительно предыдущей.

Достижение поставленной цели подразумевает выполнение двух частных задач: аналитическое описание процесса обнаружения сигнала АКП в отдельном элементе сектора поиска и разработка математической модели процесса обнаружения сигнала во всем секторе.

Аналитическое описание процесса обнаружения сигнала АКП в отдельном элементе сектора поиска

Рассматривая противостояние двух систем, БРЛС АКП и систему РТР вертолета, будем полагать, что:

- БРЛС самолета-перехватчика осуществляет обзор пространства строчно-зигзаговым методом сканирования;
- сектор поиска АКП состоит из M элементов, в одном из которых находится цель (вертолет);
- на каждый элемент сектора поиска (рис. 1) приходится четыре зондирующих импульса БРЛС АКП, следующих с некоторым периодом повторения $T_n = const$;
- принятие решения о наличии сигнала (цели) в элементе производится после каждой четвертой импульсной посылки;
- характерные размеры вертолетной системы РТР много меньше диаметра основного лепестка ДН РЛС АКП.

Рассмотрим отдельно элемент сектора поиска, вид которого изображен на рис. 2.

На нем окружности представляют собой сечения основного луча ДН в разные моменты времени, кроме того, на рис. 2 выделены области 1..4, отражающие четыре варианта событий, при нахождении цели (вертолета) в рассматриваемом элементе сектора поиска:

1 – цель накрыта одним из четырех импульсов, при этом весовой коэффициент, указывающий на данный факт, будет представлять собой соотношение $\frac{4S_1}{S_\Sigma}$, где S_Σ – суммарная

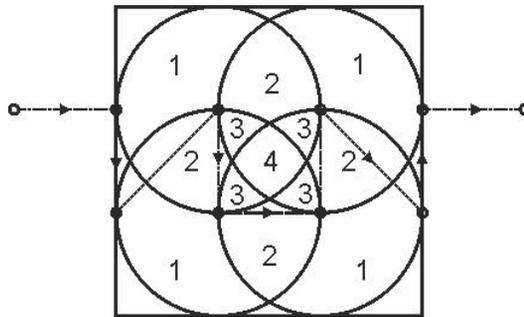


Рис. 2. Элемент сектора поиска, накрытый четырьмя импульсными посылками

площадь выделенных на рисунке областей элемента, а S_1 – площадь, обозначенная на рис. 2 цифрой 1;

2 – цель накрыта двумя импульсами, а весовой коэффициент равен $\frac{4S_2}{S_\Sigma}$;

3 – цель накрыта тремя импульсами, а весовой коэффициент равен $\frac{4S_3}{S_\Sigma}$;

4 – цель накрыта всеми четырьмя импульсами, а весовой коэффициент равен $\frac{S_4}{S_\Sigma}$.

Если принять тот факт, что цель с равной вероятностью может находиться в любой из областей элемента, то введенные коэффициенты можно трактовать как вероятности накрытия цели одним, двумя, тремя или четырьмя импульсами за время просмотра элемента.

С вертолета будет наблюдаться примерно та же картина: станция РТР вертолета в пассивном режиме будет принимать сигналы АКП в виде импульсных посылок. И в зависимости от того, в какой части элемента сектора поиска будет находиться вертолет в момент его облучения, соответствующее количество импульсов им и будет принято.

Общая формула нахождения вероятности обнаружения сигнала АКП станцией РТР вертолета может быть записана как

$$P_{обн}^{i_{\vartheta}} = \left[P_{обн} \left(A_4^* | H_{i_{\vartheta}} \cdot H_4 \right) P(H_4) + P_{обн} \left(A_3^* | H_{i_{\vartheta}} \cdot H_3 \right) P(H_3) + P_{обн} \left(A_2^* | H_{i_{\vartheta}} \cdot H_2 \right) P(H_2) + P_{обн} \left(A_1^* | H_{i_{\vartheta}} \cdot H_1 \right) P(H_1) \right] \cdot P(H_{i_{\vartheta}}), \quad (1)$$

где $P_{обн} \left(A_j^* | H_{i_{\vartheta}} \cdot H_j \right)$ – вероятность обнаружения цели при условии ее нахождения в просматриваемом (i -м) элементе сектора ($H_{i_{\vartheta}}$), в конкретной (j -й) области этого элемента ($H_j, j = 1 \dots 4$); $P(H_{i_{\vartheta}}), P(H_j)$ – вероятности выполнения этих условий.

Поскольку события, состоящие в накрытии цели одним, двумя, тремя и четырьмя импульсами, независимы и имеют одинаковую вероятность, то условные вероятности выражения (1) могут быть представлены следующим образом:

$$P_{обн} \left(A_j^* | H_{i_{\vartheta}} \cdot H_j \right) = P_{0,j} = \left[1 - (1 - P_{0,1})^j \right], \quad j = 1 \dots 4, \quad (2)$$

где $P_{0,1}$ – вероятность обнаружения цели при накрытии ее одной, независимо какой, из четырех импульсных посылок [6].

Вероятности нахождения цели в j -й области элемента $P(H_j)$ есть введенные выше весовые коэффициенты, тогда выражение (1) учетом (2) примет такой вид:

$$P_{обн}^{i_{\vartheta}} = \left[\frac{S_4}{S_\Sigma} \left[1 - (1 - P_{0,1})^4 \right] + \frac{4S_3}{S_\Sigma} \left[1 - (1 - P_{0,1})^3 \right] + \frac{4S_2}{S_\Sigma} \left[1 - (1 - P_{0,1})^2 \right] + \frac{4S_1}{S_\Sigma} P_{0,1} \right] \cdot P(H_{i_{\vartheta}}). \quad (3)$$

Площади выделенных четырех областей элемента, а также суммарное их значение могут быть найдены с использованием понятия площади сегмента круга и будут равны следующим величинам:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= r^2 \left(\frac{\pi}{12} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right), \quad S_2 = r^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right), \\
 S_3 &= r^2 \left(\frac{\pi}{12} - 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right), \quad S_4 = r^2 \left(\frac{\pi}{3} + 1 - \sqrt{3} \right),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где r – радиус сечения луча ДН БРЛС на дальности до цели.

Временная зависимость вероятности обнаружения сигнала АКП системой РТР вертолета, находясь в рассматриваемом элементе, в форме преобразования Лапласа будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 P_{обн}^{i \rightarrow}(s) &= \left[P_{01} \frac{S_1 + 2S_2 + 3S_3 + S_4}{S_{\Sigma}} \cdot e^{-sT_{и}} + \left(P_{01} \frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_{\Sigma}} + (1 - P_{01}) P_{01} \frac{S_2 + 2S_3 + S_4}{S_{\Sigma}} \right) \cdot e^{-s2T_{и}} + \right. \\
 &+ \left(P_{01} \frac{S_1 + S_2}{S_{\Sigma}} + (1 - P_{01}) P_{01} \frac{S_2 + S_3}{S_{\Sigma}} + (1 - P_{01}) P_{01} \frac{S_3}{S_{\Sigma}} + (1 - P_{01})^2 P_{01} \frac{S_3 + S_4}{S_{\Sigma}} \right) \cdot e^{-s3T_{и}} + \\
 &\left. + \left(P_{01} \frac{S_1}{S_{\Sigma}} + 2(1 - P_{01}) P_{01} \frac{S_2}{S_{\Sigma}} + 3(1 - P_{01})^2 P_{01} \frac{S_3}{S_{\Sigma}} + (1 - P_{01})^3 P_{01} \frac{S_4}{S_{\Sigma}} \right) \cdot e^{-s4T_{и}} \right] \cdot P(H_{i \rightarrow})
 \end{aligned} \tag{5}$$

Для пояснения выражения (5) на рис. 3 приведен график зависимости вероятности обнаружения сигналов сканирующей БРЛС АКП вертолетной станцией РТР от времени для разных значений вероятности $P_{0,1}$ обнаружения цели при накрытии ее одной импульсной посылкой. Четыре зондирующих импульса, обозначенные на графике ступеньками, следуют с постоянным периодом повторения ($T_{и}$), равным четырем миллисекундам.

Полученное аналитического выражение (5) затрагивает один элемент сектора поиска, что позволяет перейти к изучению процесса обнаружения сигнала АКП при просмотре вертолетной радиотехнической системой обнаружения сектора, состоящего из N элементов.

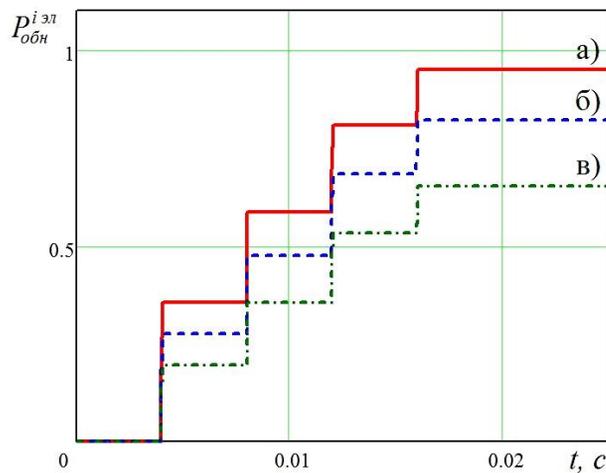


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения сигналов БРЛС АКП вертолетной станцией РТР от времени для разных значений вероятности $P_{0,1}$ обнаружения цели при накрытии ее одной импульсной посылкой: а – 0,9; б – 0,7; в – 0,5

Математическая модель процесса обнаружения сигнала АКП в N -элементном секторе поиска

Граф, отражающий процесс принятия решений вертолетной системой обнаружения в результате наблюдения i -го элемента ($i = \overline{1, N}$) сектора поиска на предмет нахождения в нем цели, будет иметь вид, показанный на рис. 4.

Известно [5], что для вероятностного описания процесса поиска должны быть известны вероятности P_{1i} , D_i и F_i . Вероятность P_{1i} – это вероятность события, состоящего в том, что в i -м элементе, при его наблюдении системой разведки, присутствует цель (объект). Рассматриваемая вероятность определяется исходя из плотности вероятности распределения местоположения цели в секторе поиска на момент времени наблюдения системой разведки i -го элемента сектора поиска. Вероятность правильного обнаружения D_i – это условная вероятность того, что по результатам наблюдения i -го элемента будет принято решение: цель в элементе сектора поиска присутствует (A_{1i}^*) при условии, что цель действительно находится в этом элементе (A_{1i}). Вероятность ложной тревоги F_i – это условная вероятность того, что по результатам наблюдения i -го элемента будет принято решение A_{0i}^* при условии, что цель (объект) в действительности отсутствует в этом элементе (A_{0i}).

Дополнительное состояние отражает последовательность просмотра элементов в соответствии с траекторией просмотра всего сектора. Вложение элементарного графа состояний, представленного на рис. 4, в общий граф, отражающий динамику поиска, будет происходить по ветвящимся направлениям. После принятия решения об обнаружении процесс поиска прекращается, переход к рассмотрению следующего элемента будет происходить в случае правильного необнаружения ($1 - F_i$) и в случае пропуска цели ($1 - D_i$). В последнем случае до конца просмотра всего сектора поиска могут происходить лишь ложные тревоги. С учетом вышеизложенного граф состояний, отражающий динамику процесса поиска одиночной цели (АКП) в секторе, состоящем из N элементов, с возможностью его многократного повторения может быть представлен в виде, показанном на рис. 5.

Для вероятностного описания процесса поиска представим его динамику в форме передаточных функций, тогда динамическая модель (рис. 5) примет вид, показанный на рис. 6.

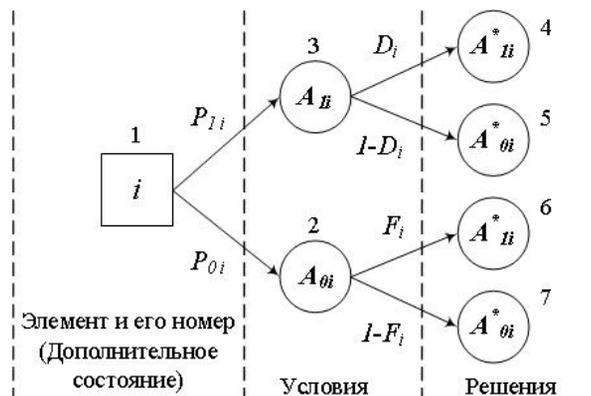


Рис. 4. Процесс принятия решения по результатам наблюдения i -го элемента сектора поиска в виде ориентированного графа состояний

Построенная динамическая модель дает возможность определить общие передаточные функции, являющие собой финальные вероятности правильного обнаружения цели и ложной тревоги в форме преобразования Лапласа:

$$H_{\Sigma D}(s) = \frac{P_1 D \varphi(s) \left[1 + P_0 \hat{F} \varphi(s) + (P_0 \hat{F} \varphi(s))^2 \right]}{1 - \left[3P_1 \hat{D} \varphi(s) (P_0 \hat{F} \varphi(s))^2 + (P_0 \hat{F} \varphi(s))^3 \right]}; \quad (5)$$

$$H_{\Sigma F}(s) = \frac{P_0 F \varphi(s) \left[1 + P_1 \hat{D} \varphi(s) + P_1 \hat{D} \varphi(s) P_0 \hat{F} \varphi(s) + P_0 \hat{F} \varphi(s) + P_1 \hat{D} \varphi(s) P_0 \hat{F} \varphi(s) + (P_0 \hat{F} \varphi(s))^2 \right]}{1 - \left[4P_1 \hat{D} \varphi(s) (P_0 \hat{F} \varphi(s))^2 + (P_0 \hat{F} \varphi(s))^3 \right]}. \quad (6)$$

Суммарные передаточные функции (5), (6) качественно определены для поиска цели в трех элементах сектора, при этом для упрощения были положены равенства $P_{1i} = P_1, P_{0i} = P_0, (i = \overline{1, N}), D_i = D, \hat{F}_i = \hat{F}$.

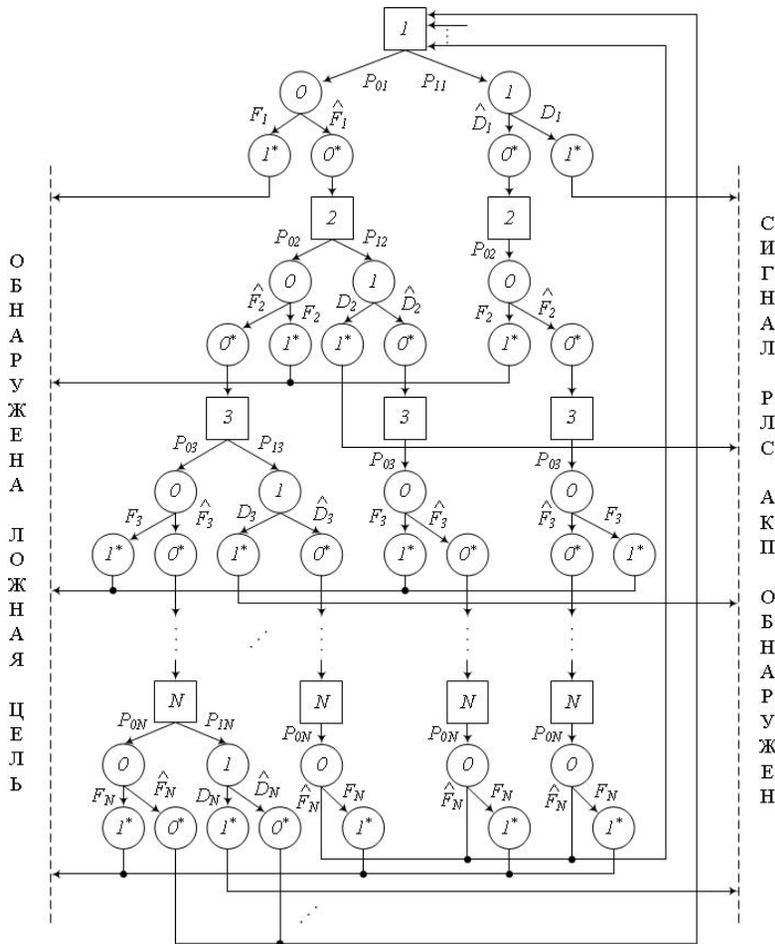


Рис. 5. Динамическая модель процесса обнаружения АКП в N-элементном секторе поиска в виде ориентированного графа состояний

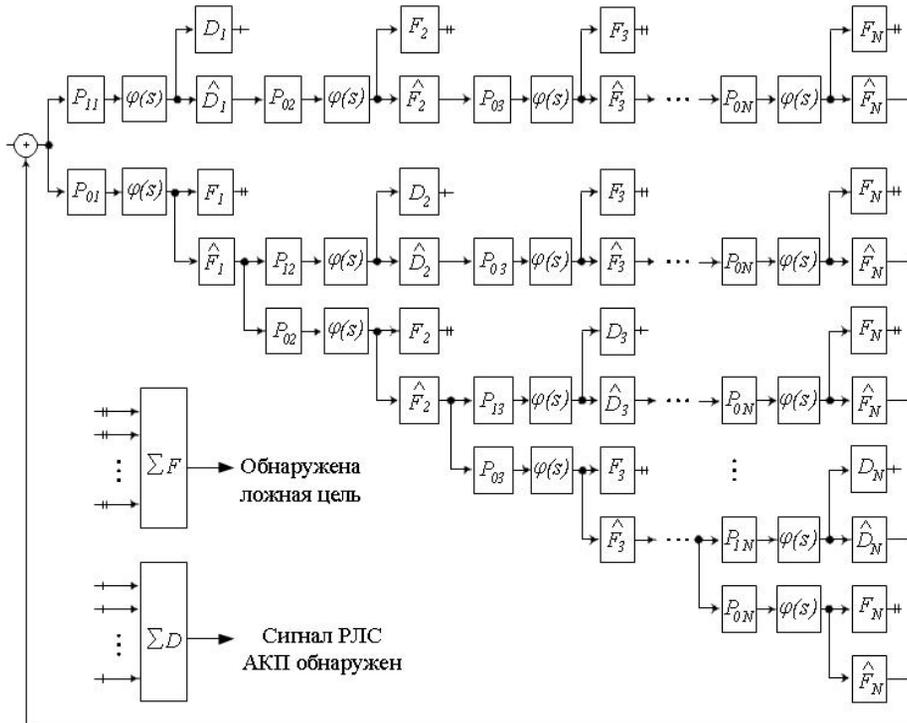


Рис. 6. Модель поиска сигнала цели вертолетной системой обнаружения при просмотре N -элементного сектора в форме передаточных функций

Кроме того, примем, что время поиска цели подчинено экспоненциальному закону распределения, параметр которого определяется значением среднего времени \bar{T}_n наблюдения одного элемента [5]:

$$\varphi(t) = L_s^{-1} \{ \varphi(s) \} = \lambda_n \exp \{ -\lambda_n t \} = \frac{1}{\bar{T}_n} \exp \left\{ -\frac{1}{\bar{T}_n} t \right\}. \quad (7)$$

Изображенные на рис. 7 зависимости вероятности P_D правильного обнаружения цели от времени t , полученные согласно (5) для разных значений среднего времени \bar{T}_n наблюдения одного элемента и значений ложной тревоги F , наглядно демонстрируют тот факт, что наибольший прирост вероятности правильного обнаружения в единицу времени тем больше, чем ниже вероятность ложной тревоги, с одной стороны, и чем быстрее принимается решение по каждому элементу сектора – с другой.

Заключение

Таким образом, разработана вероятностная модель процесса обнаружения сигнала бортовой РЛС АКП вертолетной радиотехнической системой обнаружения, учитывающая сложные траектории сканирования БРЛС и накопления неравнозначного количества сигналов вертолетной радиотехнической системой в зависимости от места положения носителя в секторе и в элементе сектора поиска.

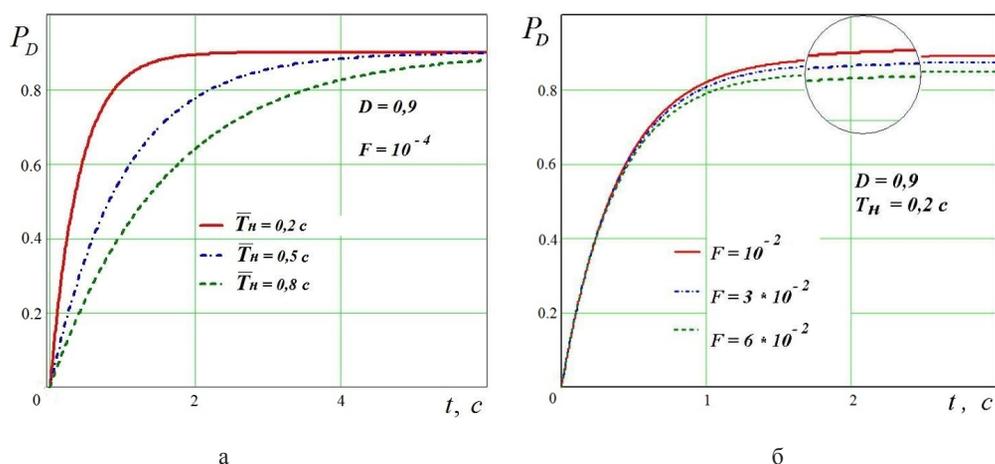


Рис. 7. Зависимости вероятности правильного обнаружения цели от времени для разных значений времени наблюдения одного элемента сектора (а) и разных значений вероятности ложной тревоги (б)

Список литературы

- [1] Козирацкий Ю.Л., Хильченко Р.Г., Столяров Д.Е. Модель дуэли «самолет-перехватчик – вертолет»: этап взаимного обнаружения. *Вестник ВВА*, 2015, 2(23), 63-69 [Koziratsky Y.L., Hilchenko R.G., Stolyarov D.E. Model Duel «Interceptor Aircraft – a Helicopter»: the Mutual Discovery Stage. *Vestnik VVA*, 2015, 2(23), 63-69 (in Russian)]
- [2] Козирацкий Ю.Л., Сирота А.А.; Хильченко Р.Г. Исследование влияния информационного обеспечения средств вооружения на исход дуэли «самолет-перехватчик – вертолет». *Материалы XV Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии»*. Воронеж: ВГУ, 2015, 1(1), 284-289 [Koziratsky Y.L., Sirota A.A., Hilchenko R.G. The Impact of Information Provision Weaponry on the Outcome of the Duel «Interceptor Aircraft – a Helicopter». *Proceedings of the XV International scientific-methodical conference «Computer science: problems, methodology, technology»*, Voronezh, VGU, 2015, 1(1), 284-289 (in Russian)]
- [3] Лепин В.Н. *Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей*. М.: Радиотехника, 2014, 296 с. [Lepin V.N. Multifunction Radar Systems of Fighter. Moscow, Radio Engineering, 2014, 296 p. (in Russian)]
- [4] Козирацкий Ю.Л. *Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения*. М.: Радиотехника, 2013. 232 с. [Koziratsky Y.L. Models of Conflict Information Search and Discovery Tools. Moscow, Radio Engineering, 2013, 232 p. (in Russian)]
- [5] Козирацкий Ю.Л. *Модели пространственного и частотного поиска*. М.: Радиотехника, 2013, 344 с. [Koziratsky Y.L. Models of Spatial and Frequency Search. Moscow, Radio Engineering, 2013, 344 p. (in Russian)]
- [6] Дуров В.Н. *Боевое применение и боевая эффективность истребителей перехватчиков*. М.: Воениздат, 1972, 280 с. [Durov V.N. Combat Employment and Combat Effectiveness of the Fighter Interceptor. Moscow, Military Publishing, 1972, 280 p. (in Russian)]