

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ОТНОШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБНАРУЖИТЕЛЕ

Свинарский М.В., Яролик С.Н.

Военная академия Республики Беларусь, Минск, e-mail: mechislav1993@gmail.com

Радиолокационное обнаружение сводится к принятию решения о наличии или отсутствии цели в анализируемом элементе разрешения. При отсутствии помех особой проблемы в процессе принятия такого решения не возникает, так как наличие или отсутствие сигнала на выходе приемника достоверно свидетельствует о наличии или отсутствии цели в соответствующем участке пространства наблюдения. Вследствие неизбежного наличия помех, присутствия флуктуаций отраженного сигнала, а также вероятной ограниченности времени наблюдения процесс принятия решения о наличии или отсутствии цели существенно затрудняется. В связи с этим задача радиолокационного обнаружения является статистической. Для решения задачи обнаружения необходимо располагать априорными сведениями о характеристиках полезного сигнала и помех (закон модуляции зондирующего сигнала, статистические характеристики шума, мешающих отражений, отраженного сигнала). Эти сведения позволяют найти методы обработки принятых сигналов на фоне помех, оптимальные с точки зрения используемых критериев, а также синтезировать структуру устройств оптимальной обработки сигналов и оценить показатели качества их функционирования.

Радиолокационный поиск целей представляет собой процесс обследования определенной области пространства для обеспечения радиолокационного контакта с целью на время, достаточное для обнаружения отраженного сигнала с заданной вероятностью ложных тревог [1]. С этой целью осуществляют обзор требуемой области пространства по угловым координатам, дальности и радиальной скорости, в процессе, которого для каждого элемента разрешения решают статистическую задачу обнаружения сигнала на фоне помех.

Возможны два режима просмотра пространства наблюдения [1]:

– поиск по жесткой программе, которая не зависит от изменяющейся целевой обстановки и закладывается в РЛС заранее (на этапе ее проектирования) применительно к наиболее вероятным или наиболее сложным условиям наблюдения.

– поиск по гибкой программе, которая адаптируется к изменяющейся целевой обстановке (адаптивный поиск).

Первый режим типичен для РЛС с механическим или электромеханическим сканированием луча антенны (рисунок 1).

В этом случае сигналы обнаруживаются по результатам обработки пачки из нескольких отраженных от цели импульсов, число которых ограничивается значением имеющегося в наличии времени наблюдения [2]. При известном отношении сигнал шум (ОСШ), определяемом энергетическим потенциалом РЛС, эффективной площадью рассеяния цели и уровнем собственных и внешних шумов, требуемое количество обрабатываемых импульсов определяют исходя из условия обеспечения заданных характеристик обнаружения (вероятности ложной тревоги и вероятности правильного обнаружения).

Обнаружители обрабатывающие фиксированное число импульсов – это обнаружители с фиксированным объемом выборки [2]. Реализация обнаружителей с фиксированным объемом выборки (минимизация вероятности ошибочных решений) осуществляется на основе критерия Неймана-Пирсона. Недостатками радиолокаторов с фиксированным объемом выборки являются существенные временные затраты на принятие решения о наличии или отсутствии сигнала в элементах разрешения в которых отсутствуют наблюдаемые объекты [3].

Наметившаяся тенденция к ужесточению требований к радиосистемам и увеличению объема выполняемых ими задач обуславливает необходимость поиска новых решений при их проектировании. В связи с этим функциональные возможности радиоаппаратуры должны предусматривать гибкое изменение характеристик и параметров в зависимости от

складывающейся оперативной ситуации, при одновременном удовлетворении требованиям к электромагнитной совместимости устройств различного назначения [3].

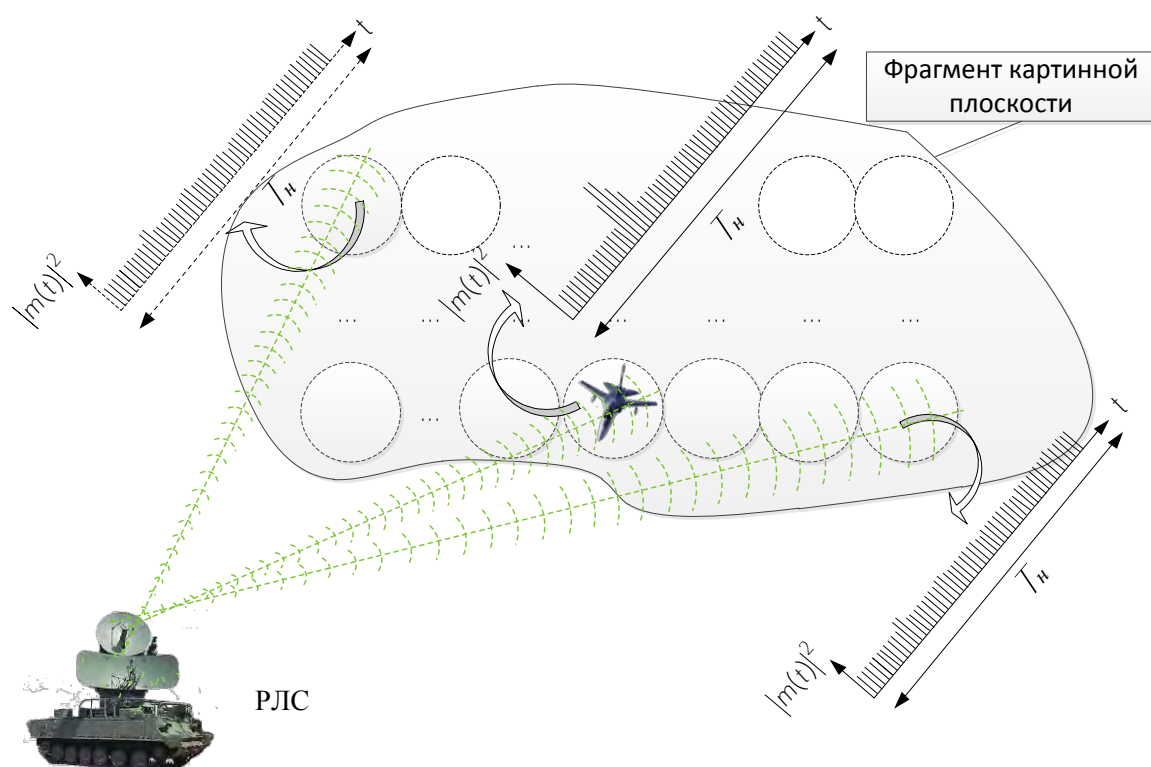


Рисунок 1 – Поиск целей по жесткой программе

Анализ технических характеристик современных антенных систем и опыт их использования в различных радиосистемах показывают, что наиболее полно требованиям к антенным системам радиоаппаратуры многофункционального назначения, отвечают фазированные антенные решетки (ФАР). ФАР играют сегодня особую роль в современной радиоэлектронике. Их применение позволило увеличить скорость обзора пространства, улучшить характеристики антенных систем, обеспечить возможность многофункциональной работы РЛС различного назначения.

Применение поиска целей по жесткой программе в РЛС с ФАР, как правило, оказывается нецелесообразным, так как сопровождается равномерным распределением поисковых усилителей – энергии передатчика и времени поиска между всеми элементами разрешения. Поскольку число «пустых» элементов разрешения значительно больше числа элементов с целями, что ведет к неэффективным затратам энергии и поисковых усилий [1, 3].

Адаптивное управление лучом ФАР позволяет существенно сократить временные затраты на решение задачи обнаружения, поскольку число обрабатываемых импульсов в каждом положении луча может адаптироваться к конкретной ситуации (рисунок 2).

Использование варианта адаптивного поиска целей позволяет рационально распределять энергию зондирующего сигнала в пространстве наблюдения. При этом среднее число обрабатываемых импульсов (при заданных характеристиках обнаружения) может быть минимизировано на основе критерия последовательного наблюдения Вальда [4] или последовательного байесовского критерия [1]. Рассматриваемый подход позволяет наиболее полно использовать потенциальные возможности ФАР по повышению пропускной способности РЛС. Кроме того, в ряде случаев для обеспечения качественного обнаружения объектов в

сложных условиях наблюдения появляется возможность существенно увеличивать время наблюдения, переходя к некогерентному накоплению наблюдаемых сигналов, выходя за пределы времени когерентности обрабатываемых сигналов.

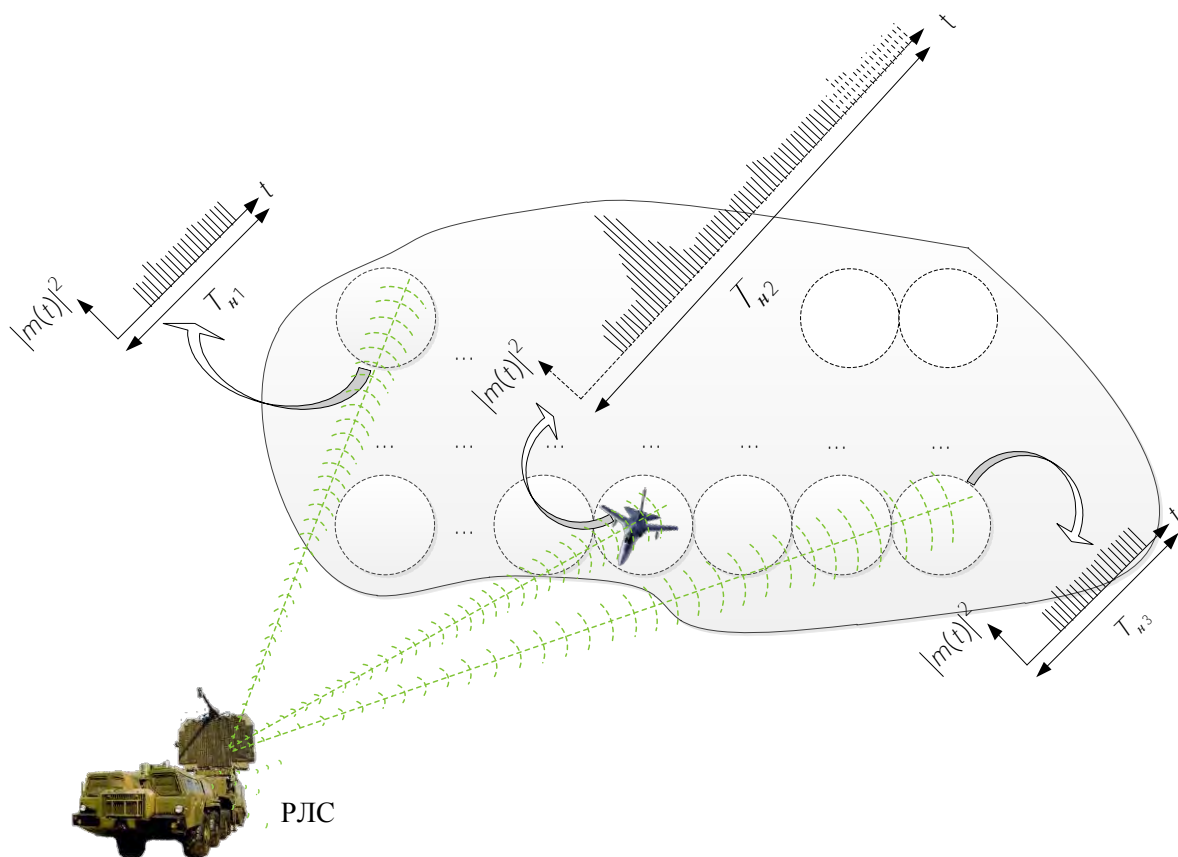


Рисунок 2 – Адаптивный поиск целей по гибкой программе

Известно [2], что некогерентное накопление (НН) сигналов не приводит к изменению в отношении сигнал-помеха, но позволяет обеспечить выигрыш в характеристиках обнаружения за счет трансформации распределения решающей статистики. В радиолокационном тракте обработки некогерентному накоплению подвергаются отсчеты, наблюдаемые на выходе квадратичного детектора $Z_k = |S_k|^2$. Чаще всего эти отсчеты представляют собой квадраты модуля нормально распределенных случайных величин $S_{(I, II)k}$, получаемых с выхода устройства когерентной междупериодной обработки. В этом случае выходные сигналы квадратичного детектора характеризуются экспоненциальным законом распределения, а отсчеты после некогерентного накопления принято характеризовать χ^2 (хи-квадрат) распределением:

$$p(Z) = \left(\frac{n}{\bar{Z}}\right)^n Z^{n-1} \frac{1}{\Gamma(n)} e^{-\frac{n}{\bar{Z}}Z}, \quad Z \geq 0, \quad (1)$$

где \bar{Z} – среднее значение случайной величины;

$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt$ – полная гамма функция.

Важный параметр этого распределения – число степеней свободы $2n$ (определяется условиями наблюдения отсчетов). Графики χ^2 распределения для различных значений n и $\bar{Z} = 1$ приведены на рисунке 3.

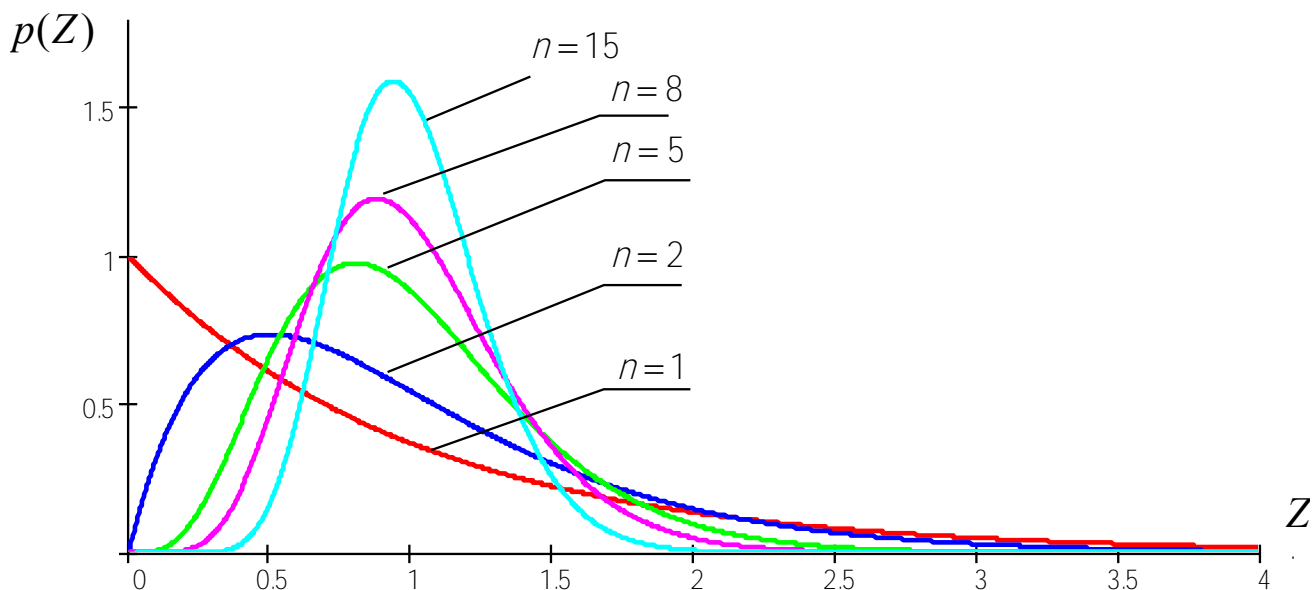


Рисунок 3 – Иллюстрация изменения распределения суммы квадратов, независимых гауссовских величин по мере увеличения числа слагаемых

Условные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги определяются путем интегрирования соответствующих плотностей распределения:

$$F = \int_{Z_*}^{\infty} p_0(Z) dZ = \frac{\Gamma(n_0, n_0 \lambda_*)}{\Gamma(n_0)} ;$$

$$D = \int_{Z_*}^{\infty} p_1(Z) dZ = \frac{\Gamma\left(n_1, \frac{n_1 \lambda_*}{1 + \mu}\right)}{\Gamma(n_1)} . \quad (2)$$

где $\lambda_* = Z_*/\bar{Z}_0$ – относительный порог;

$\Gamma(n, x) = \int_x^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt$ – неполная гамма функция;

$p_0(Z)$ – плотность вероятности, если наблюдается только шум.

$p_1(Z)$ – плотность вероятности, если наблюдается сигнал и шум.

n_0, n_1 – число полу степеней свободы хи-квадрат распределения.

μ – относительная интенсивность сигнала.

Значительно более быстрое убывание нормального распределения в области надпороговых значений выходной случайной величины, по сравнению с убыванием экспоненциального распределения (рисунок 4) приводит к тому, что при одинаковых вероятностях ложной тревоги при когерентном и некогерентном накоплении $F = F_{\text{нн}}$ вероятности правильного обнаружения при НН будут существенно больше, чем при когерентном накоплении: $D < D_{\text{нн}}$.

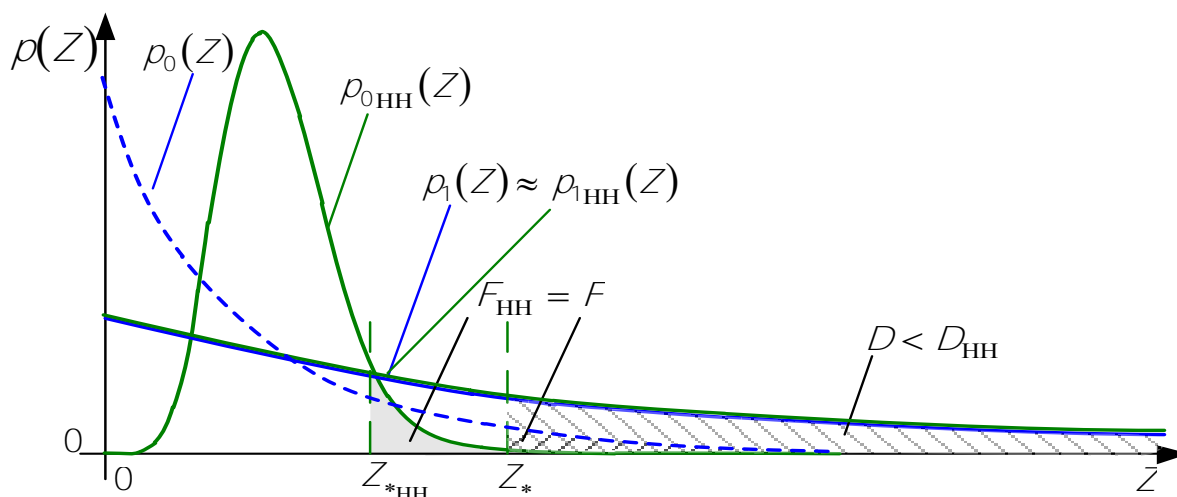


Рисунок 4 – Иллюстрация выигрыша в характеристиках обнаружения при использовании некогерентного накопления

Отмеченный факт обуславливает улучшение характеристик обнаружения при использовании НН.

Увеличение времени некогерентного накопления предполагает использование последовательных процедур принятия решения, предполагающих использование следующего решающего правила:

если $\Lambda \leq \Lambda_*$, то принимается решение об отсутствии цели (A_0^*),

если $\Lambda \geq \Lambda^*$, то принимается решение о наличии цели (A_1^*),

если $\Lambda_* < \Lambda < \Lambda^*$, то принимается решение о продолжении наблюдения (A_2^*),

где $\Lambda = \frac{\rho_1(Z)}{\rho_0(Z)}$ – отношение правдоподобия;

$\Lambda_* = \frac{1-\beta}{\alpha}$ - нижний порог (последовательной процедуры предложенной Вальдом);

$\Lambda^* = \frac{\beta}{1-\alpha}$ - верхний порог (последовательной процедуры предложенной Вальдом);

α - ошибка первого рода (вероятность ложной тревоги F);

β - ошибка второго рода (условная вероятность пропуска цели \hat{D}).

В соответствии с приведенным правилом принятия решения структура обнаружителя имеет вид, приведенный на рисунке 5.

Устройство радиолокационного обнаружения, реализующее последовательный критерий обнаружения Вальда, предполагает формирование решающей статистики (отношения правдоподобия либо его логарифма) по результатам текущего зондирования в анализируемом угловом направлении либо до момента выхода за пределы останавливающих порогов, либо до момента принудительного усечения процедуры обнаружения [4] (рисунок 6).

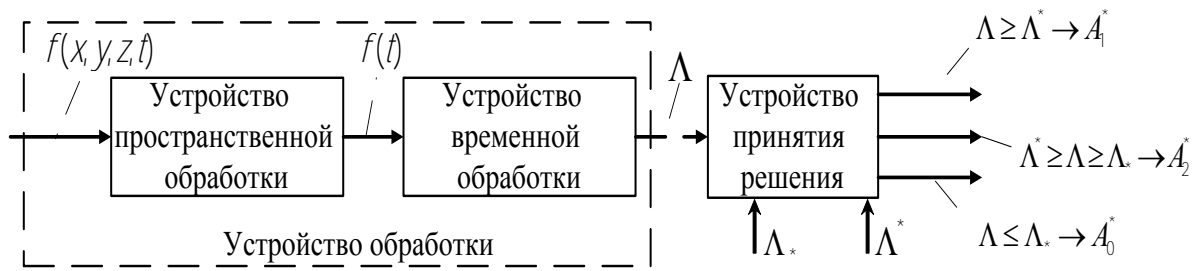


Рисунок 5 – Структура обнаружения с учетом пространственно–временной последовательной обработки принятого сигнала

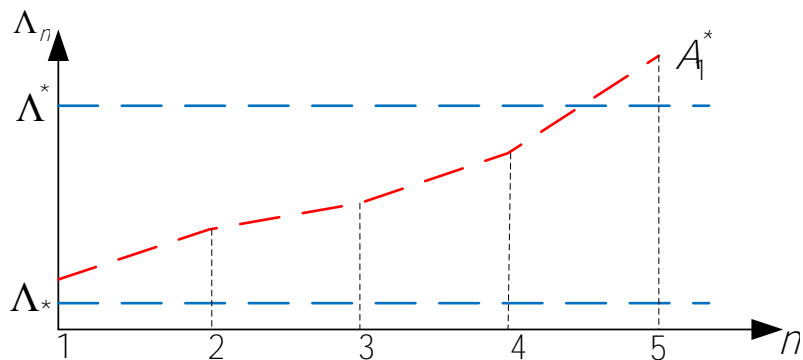


Рисунок 6 – Принятие решения об обнаружении цели при использовании последовательного критерия Вальда

Отметим, что использование возможности принудительной остановки, процедуры обнаружения позволяет исключить ситуации возможного «затягивания обзора».

Результаты расчета показателей качества принимаемых решений для заданных условий наблюдения ($\gamma = const$, $F = const$) представлены в виде удобных для анализа графиков на рисунках 7 и 8. Для сравнения на этих же графиках приведены характеристики обнаружения для обнаружителя, построенного на основе критерия Неймана-Пирсона.

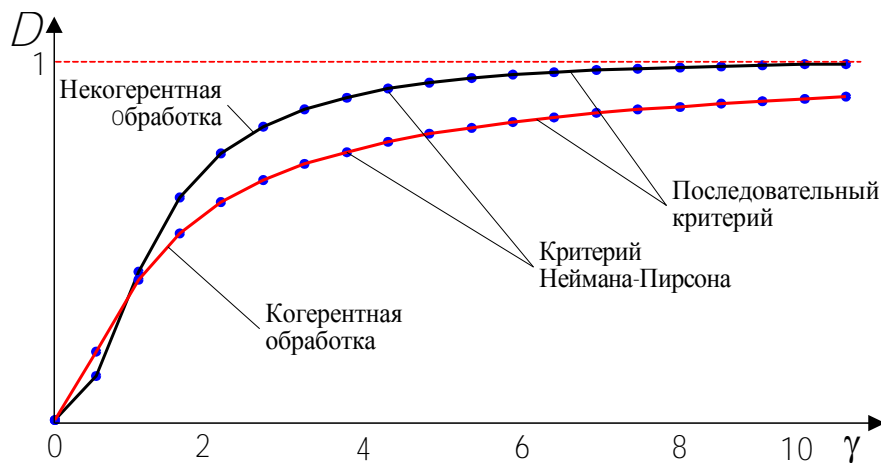


Рисунок 7 – Графики характеристик обнаружения

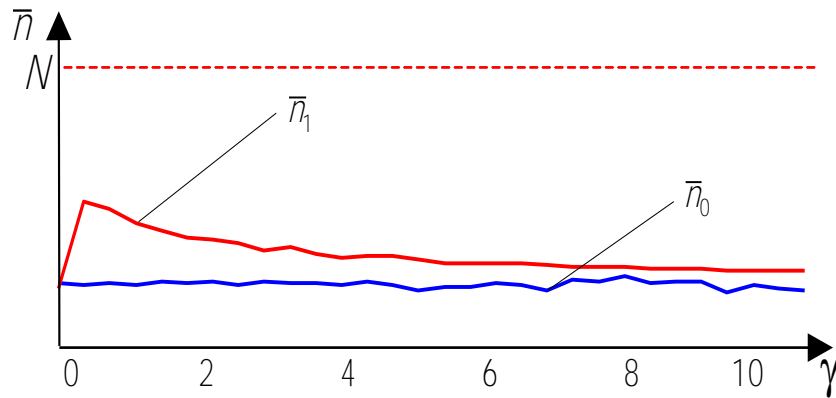


Рисунок 8 – Графики средней длительности процедуры принимаемых решений при последовательном обнаружении объектов (\bar{n}_0 - средняя длительность последовательной процедуры при отсутствии полезного сигнала, \bar{n}_1 - средняя длительность последовательной процедуры при наличии полезного сигнала, N - длительность фиксированной процедуры)

Полученные результаты моделирования показывают, что использование последовательного алгоритма проверки гипотез в интересах обнаружения радиолокационных объектов обеспечивает сокращение среднего объема выборки по сравнению с критерием Неймана-Пирсона (при одинаковых значениях вероятностей ложной тревоги $F_B = F_{\text{нп}}$, пропуска цели $\hat{D} = \beta_B = \beta_{\text{нп}}$ и текущего значения отношения сигнал-шум γ).

Очевидно, что при обеспечении одинаковых характеристик обнаружения (данный факт обеспечивался соответствующим выбором порогов обнаружения) средняя длительность последовательной процедуры обнаружения была существенно меньше (см. рисунок 8).

Полученные результаты моделирования подтвердили правильность утверждений о целесообразности использования последовательных процедур принятия решения в интересах оптимизации радиолокационного обзора пространства.

Список литературы

1. Шишов Ю.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов / Ю.А. Шишов, В.А. Ворошилов. М: Радио и связь, 1987. – 144 с.
2. Охрименко, А.Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации – М.: Воениздат, 1983. – 456 с.
3. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин – М: «Сов. радио», 1974 – 432 с.
4. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд. Пер. с англ. – М: Гос. изд. физико-мат. литературы, 1960. – 328 с.