

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА ДЛЯ РАДИОЛОКАТОРА С ПОЛНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ПРИЁМОМ

к.ф.-м.н. Н.В. Верденская, И.А. Иванова, д.т.н. В.В. Сазонов
ОАО Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца
verdenskaya@rti-mints.ru

Работа посвящена исследованию алгоритмов обнаружения для радиолокатора, излучающего сигнал с круговой поляризацией и осуществляющего приём отражённого сигнала на две ортогональные поляризации. Проведено сравнение эмпирических алгоритмов обнаружения с оптимальным алгоритмом, требующим дополнительной информации о поляризационной матрице рассеяния объекта. На основании сравнения сделан вывод о том, какой из обнаружителей целесообразно использовать на практике.

Современные радары позволяют измерять поляризационные характеристики объектов, что даёт дополнительную информацию о наблюдаемом объекте при решении задачи обнаружения. Возникает вопрос: как наиболее эффективно использовать эту информацию, чтобы достичь наилучших характеристик обнаружения? Чтобы ответить на него нужно сформулировать и решить задачу оптимального обнаружения, иными словами, построить оптимальный обнаружитель. Однако тут возникают некоторые проблемы. Задача построения оптимального обнаружителя легко решается, если предположить, что наблюдателю известна поляризационная матрица рассеяния объекта. Однако на практике это не так. Аналитически решить задачу оптимального обнаружения при неизвестной матрице рассеяния объекта пока не удаётся. В связи с этим, при обработке сигнала в радаре чаще всего используются те или иные эмпирические обнаружители. Целью данной работы является моделирование и сравнение эффективности таких обнаружителей с оптимальным обнаружителем, полученным в предположении, что поляризационная матрица рассеяния известна, с одной стороны, и с оптимальным одноканальным обнаружителем с другой. В последнем случае предполагается, что радар осуществляет излучение и приём на одной и той же поляризации.

Поскольку рассчитать характеристики эмпирических алгоритмов обнаружения удаётся не всегда, для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования. При этом наблюдения моделировались как многомерные коррелированные случайные величины с использованием метода, предложенного в работе [1], а характеристики обнаружения (вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги) рассчитывались методом Монте-Карло с объёмом выборки 10^6 . Рассматривались четыре объекта: спираль и округлый объект, не являющийся точной сферой, а также конус и цилиндр с идеально проводящими поверхностями. Предполагалось, что, помимо шумовой компоненты, в наблюдениях присутствует пассивная помеха.

В качестве исходных данных рассматривался "поляризационный вектор" рассеяния, который представляет собой вектор, составленный из различных элементов матрицы рассеяния – $X=(HH, HV, VV)'$, т.е. считалось, что наблюдению подлежат непосредственно элементы матрицы рассеяния или их линейная комбинация. Как было показано в [2], это возможно, если проводится предварительная обработка, включающая согласованную фильтрацию и фазовое детектирование сигнала. При этом мощность излучаемого импульса считается равной 1, а отношение сигнал-шум при моделировании варьируется за счёт увеличения шума. Более подробное описание модели сигнала можно найти в работах [2, 3]. При такой постановке задачи эффективность рассматриваемых алгоритмов зависит только от вида алгоритма и свойств цели, а излучаемая мощность всегда одинакова. Обозначив отражение от цели вектором X_t (target), отражение от мешающего объекта вектором X_c (clutter), шумовую компоненту вектором ζ , компоненты которого независимы и имеют гауссовское распределение с нулевым средним и малой дисперсией σ^2 , запишем вектор наблюдения X в виде $X=X_c+\zeta$ при отсутствии сигнала и в виде $X=X_t+X_c+\zeta$ при его наличии. Будем считать, что векторы X_t , X_c имеют комплексное гауссовское распределение

$$p(X) = \frac{1}{\pi^3 |\Sigma|} \exp\left\{- (X - A)^+ \Sigma^{-1} (X - A)\right\},$$

где $A=EX$ – математическое ожидание вектора X , $\Sigma=E[(X-A)(X-A)^+]$ – его ковариационная матрица, при этом символом E обозначено математическое ожидание, а символом $(\cdot)^+$ – комплексное сопряжение и транспонирование (эрмитовское сопряжение). Поскольку все величины – гауссовские, то шумовую компоненту ζ можно без ограничения общности включить в помеху и писать $X=X_t+X_c$ при наличии сигнала и $X=X_c$ - при его отсутствии.

Как следует из экспериментальных данных ([2, 5]), матрица Σ_k имеет специальный X -образный вид:

$$\Sigma_k = \sigma_k^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & \rho_k \sqrt{\gamma_k} \\ 0 & \varepsilon_k & 0 \\ \rho_k^* \sqrt{\gamma_k} & 0 & \gamma_k \end{bmatrix},$$

где

$$\sigma_k = E\{|HH|^2\}, \varepsilon_k = \frac{E\{|HV|^2\}}{E\{|HH|^2\}}, \gamma_k = \frac{E\{|VV|^2\}}{E\{|HH|^2\}}, \rho_k = \frac{E\{HH^*VV^*\}}{\sqrt{E\{|HH|^2\}} E\{|VV|^2\}}},$$

$k=t, c$, а символом $(\cdot)^*$ здесь и далее обозначается комплексное сопряжение.

Под стабильной целью будем понимать цель, отражение от которой не меняется во время зондирования: $X_t \equiv A$, где A – постоянный комплексный вектор.

Для исследуемого радиолокатора, излучающего сигнал круговой поляризации и принимающего отражённый сигнал двумя каналами с ортогональными поляризациями (радиолокатор с полным поляризационным приёмом), исходные данные $X=(HH, HV, VV)^t$ должны быть преобразованы в соответствии тем, какую информацию о поляризационной матрице рассеяния получает радар. В этом случае модель наблюдений можно задать следующим образом:

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} HH + iHV \\ HV + iVV \end{pmatrix}.$$

Предполагая, что X – гауссовский вектор с произвольными средним A и матрицей ковариации Σ , выразим среднее и ковариационную матрицу вектора W через A и Σ . Введём матрицу

$$G = \begin{pmatrix} 1 & i & 0 \\ 0 & 1 & i \end{pmatrix}.$$

Легко видеть, что

$$W = GX.$$

Положим

$$B = EW = GA, \Omega = E\left\{((W - B)(W - B)^+)\right\} = G\Sigma G^+,$$

где A – постоянный вектор, соответствующий отражению от стабильной цели.

Все рассмотренные в работе алгоритмы обнаружения сводятся к пороговой процедуре

$$\begin{cases} H_0 : S(W) < h, \\ H_1 : S(W) \geq h, \end{cases}$$

со статистиками $S(W)$ различного вида.

Заранее известно, что наилучшими характеристиками обладают оптимальные обнаружители. В работе рассматриваются два оптимальных обнаружителя – оптимальный обнаружитель для двухканального радиолокатора (при известной поляризационной матрице рассеяния) и оптимальный обнаружитель для одноканального радиолокатора. Заметим, что из теории не следует, что двухканальный обнаружитель для любого наблюдаемого объекта

превосходит одноканальный. Моделирование показывает, что существуют объекты (или соответствующие их ракурсы) для которых это не так.

Статистика для оптимального двухканального обнаружителя (ОДК) имеет вид:

$$|W^+ \Omega^{-1} B|.$$

Статистика одноканального оптимального обнаружителя (ОК-НН, ОК-НВ, ОК-ВВ) задаётся формулой:

$$S(X) = |a||z|,$$

где $a=Ez$, $z=HH$, HV , VV или их линейная комбинация в зависимости от ориентации радиолокатора.

Помимо оптимальных обнаружителей в работе рассмотрены:

- обнаружитель, статистика которого представляет собой сумму модулей каналов. В дальнейшем он называется "некогерентное суммирование в каналах" (ДНС). Его статистика задаётся формулой

$$S(W) = |W_1|^2 + |W_2|^2.$$

- обнаружитель, статистика которого равна максимуму модулей каналов (ДКМ):

$$S(W) = \max_k |B_k W_k^*|.$$

Его мы будем называть "максимум по каналам".

- кроме того, рассмотрены два обнаружителя, для которых решающими статистиками являются модули когерентной суммы:

$$S(W) = |W_1 + iW_2|,$$

и когерентной разности каналов:

$$S(W) = |W_1 - iW_2|.$$

Их будем называть "когерентной суммой" (ДКС) и "когерентной разностью" (ДКВ) соответственно.

Для большинства рассмотренных алгоритмов характеристики обнаружения удаётся рассчитать аналитически. Исключение составляет процедура "максимум из каналов". Формулы, задающие вероятности ошибок, приведены в работе [6].

На Рис.1-3 приведены графики характеристик обнаружения рассмотренных обнаружителей для округлого объекта и конуса.

Проведённые исследования и математическое моделирование позволяют сделать следующие выводы:

1. Из эвристических алгоритмов для практического использования предпочтительны алгоритмы некогерентного суммирования и выбора "максимума по каналам". Эти алгоритмы не зависят от характеристик объекта и в большинстве случаев незначительно ($\sim 1,5 \div 2$ дБ для тестовых и для модельных объектов) проигрывают по мощности оптимальному алгоритму.
2. Алгоритмы, использующие когерентную обработку, существенно зависят от ракурса и, соответственно, от поляризационных характеристик цели и могут в ряде случаев быть очень эффективными, а в ряде случаев вообще не работать.
3. Характеристики обнаружения существенно зависят от поляризационных характеристик цели. В ряде случаев двухканальный оптимальный радиолокатор с полным поляризационным приёмом может проигрывать одноканальному радиолокатору, наилучшим образом согласованному с целью по поляризации, при условии, что излучаемые этими радиолокаторами сигналы имеют одинаковые мощности.

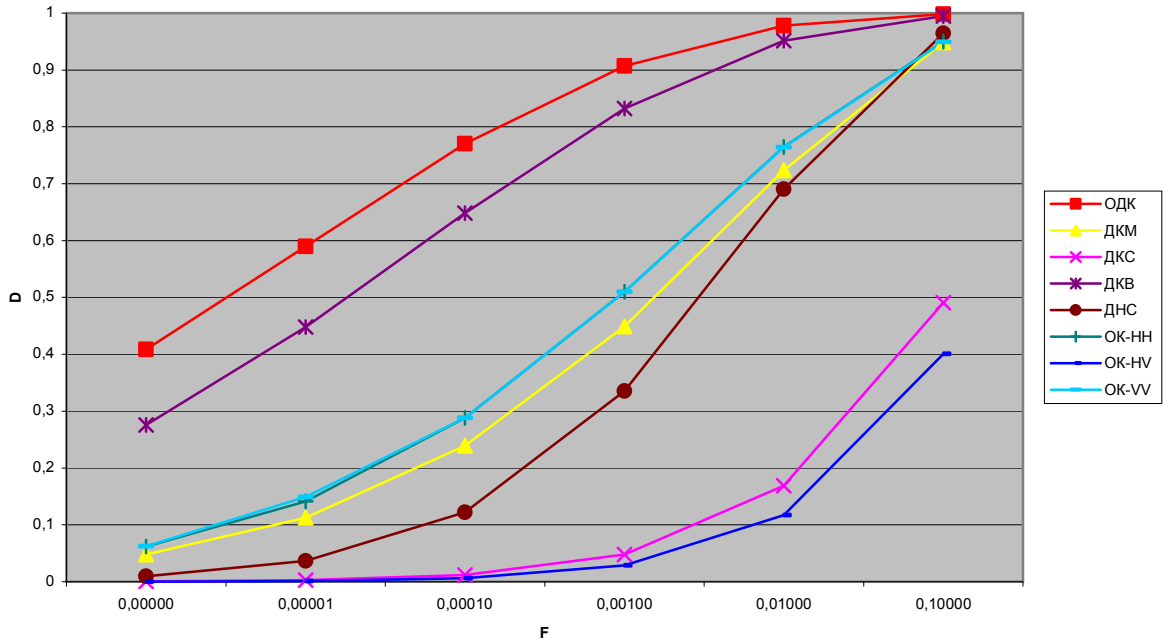


Рис. 1 Зависимость D от F для отношения сигнал-шум $q=11.24$. Округлый объект

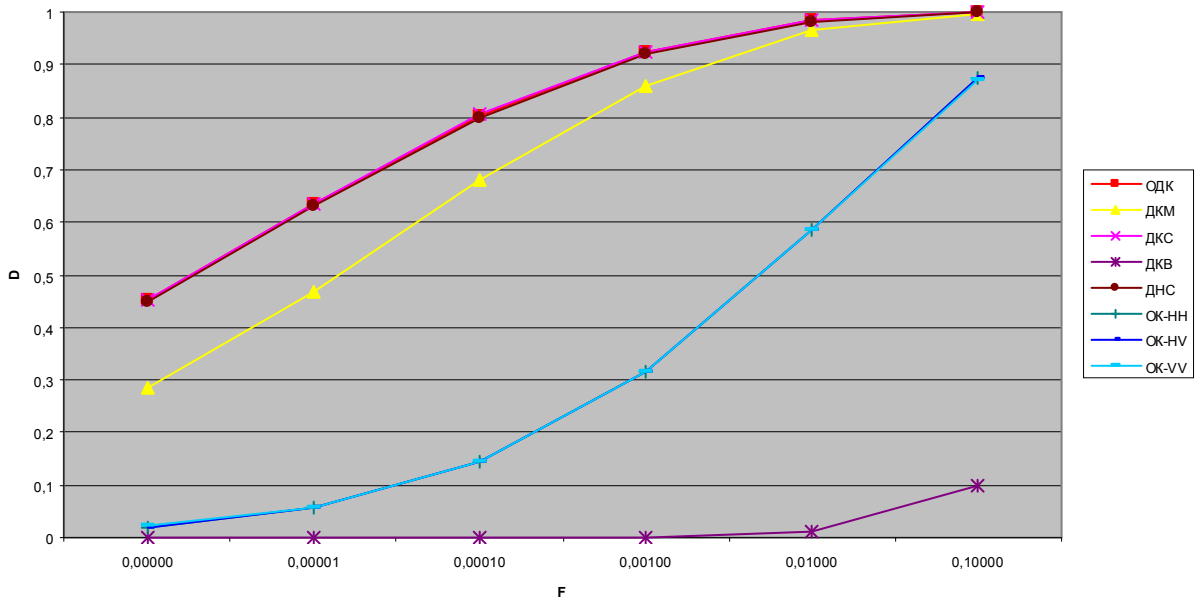


Рис. 2 Зависимость D от F для отношения сигнал-шум $q=11.23$. Спираль

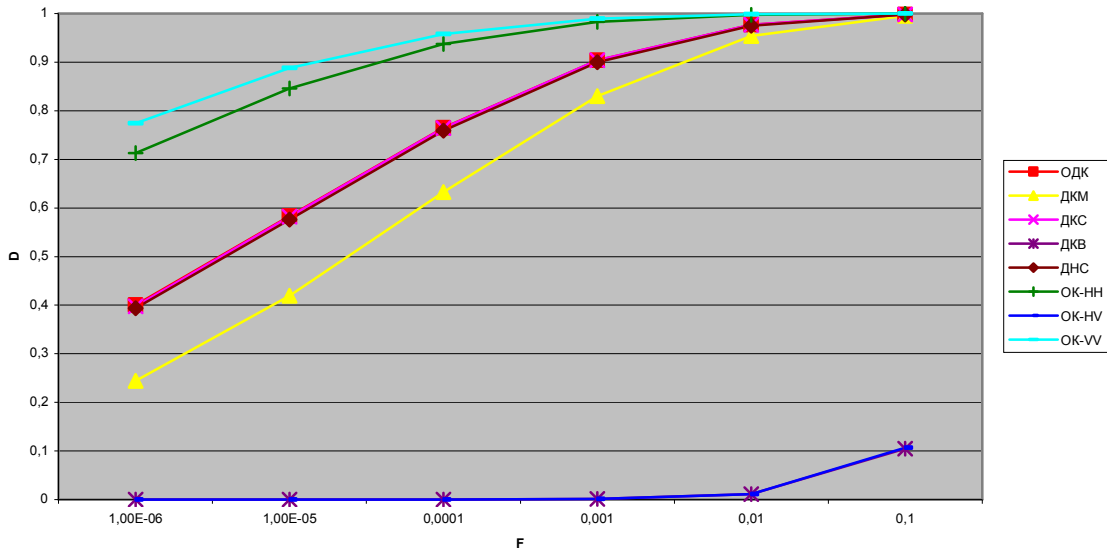


Рис. 3 Зависимость D от F для модели конуса. Угол наклона - 0 градусов. Отношение сигнал-шум $q=11.23$

ЛИТЕРАТУРА

1. Пригарин С.М. Введение в численное моделирование случайных процессов и полей.- Новосибирск, НГУ, 1999, 301 стр.
2. А.З. Киселёв, Теория радиолокационного обнаружения на основе использования векторов рассеяния, С.-Пб., "Наука", 2005, 295 с.
3. Н.В. Верденская, И.А. Иванова, В.В. Сазонов. Сравнение эффективности обнаружения различных типов поляризационных радиолокаторов. Отчет №1987. М., 2007, 60с.
4. Н.В. Верденская, И.А. Иванова, В.В. Сазонов. Моделирование алгоритмов обнаружения при различных видах поляризационного приема. Отчет № 1995. М., 2009, 44 с.
5. L. M. Novak, M. B. Sechtin, M. J. Cardullo, Studies of Target Detection Algorithms That Use Polarimetric Radar Data, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-25, No.2, March, 1989.
6. Н.В. Верденская, И.А. Иванова, В.В. Сазонов. Исследование эффективности двухканального поляриметрического радиолокатора при различных алгоритмах обработки. Отчет № 1994. М., 2009, 41 с.