

## О ПОВЫШЕНИИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ ПО МЕЖЧАСТОТНОМУ КОРРЕЛЯЦИОННОМУ ПРИЗНАКУ

*Бартенев В.Г., профессор, д.т.н., МИРЭА – Российский технологический университет,  
e-mail: syntaltechno@mail.ru*

*Бартенев Г.В., аспирант АО «ВНИИРТ»*

### ON INCREASING THE SPEED OF RADAR TARGETS RECOGNITION BASED ON THE INTER-FREQUENCY CORRELATION COEFFICIENT

*Bartenev V.G., Bartenev G.V.*

*The problem of recognition of radar targets by their longitudinal size using the inter-frequency correlation coefficient is considered. To increase the speed of recognition in one radar sweep, it is proposed to preliminarily de-correlate the received signals at each of the carrier frequencies.*

**Key words:** recognition of radar targets, inter-frequency correlation coefficient, decorrelate the received signals. The problem of recognition of radar targets by their longitudinal size using the inter-frequency correlation feature is considered.

**Ключевые слова:** распознавание РЛ сигналов, межчастотный корреляционный признак, вероятность правильного распознавания, оценка максимального правдоподобия модуля межчастотного коэффициента корреляции.

*Рассмотрена проблема распознавания радиолокационных целей по их продольному размеру, используя межчастотный корреляционный признак. Для повышения быстродействия распознавания за один обзор РЛС предлагается предварительно производить декорреляцию принимаемых сигналов на каждой из несущих частот.*

#### Введение

Предлагаемый способ повышения быстродействия распознавания целей относится к цифровой обработке радиолокационных сигналов. В работе [1] показано, что для распознавания обнаруженных объектов по их продольному размеру можно использовать характер флюктуаций отраженных сигналов на разных несущих частотах. В частности, в основе этого сигнального признака распознавания лежит взаимосвязь значения нормированного межчастотного коэффициента корреляции с линейными размерами объекта. Чем больше размер объекта, тем меньше межчастотный коэффициент корреляции. В частности, известен способ распознавания объектов по их продольному размеру [2], в котором две выборки наблюдения принятых на двух разнесенных несущих частотах перемножаются и их произведение накапливается от обзора к обзору для каждого элемента дальности и нормированный модуль накопленного произведения сравнивается с порогом. Полученная таким образом оценка максимального правдоподобия модуля межчастотного коэффициента корреляции сравнивается с порогом в каждом элементе дальности, на основании чего принимается решение о наличии объекта с большим продольным размером (порог не превышен) или малого продольного размера (порог превышен). Хотя данный способ позволяет осуществлять эффективное распознавание объектов по межчастотному корреляционному признаку, однако требует использования независимых выборок наблюдения, что приводит к использованию выборки принимаемых сигналов от обзора к обзору, приводя к большим временным затратам. Если же использовать выборки наблюдений в одном обзо-

ре, производя формирование оценки модуля межчастотного коэффициента по коррелированным выборкам пачки отраженных сигналов, то, как это показано в [3], это приводит к существенному снижению вероятности правильного распознавания объектов.

С целью преодолеть данный недостаток и повысить быстродействие без снижения эффективности распознавания объектов по их продольному размеру предлагается способ распознавания за один обзор, в котором предварительно до формирования оценки модуля межчастотного коэффициента корреляции производят на каждой несущей частоте декорреляцию выборок наблюдения, для уменьшения их межпериодной корреляции. Декорреляцию выборок наблюдения можно выполнить с помощью обесцараживающего фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр), использующего в качестве весовых коэффициентов оценки коэффициентов авторегрессии (АР). Известно несколько методов оценки коэффициентов АР. Далее для этого будет использован метод Берга [4].

Рассмотрим известный и предлагаемый способы более подробно. Для того чтобы сформировать межчастотный коэффициент корреляции, используют наиболее эффективный алгоритм в виде оценки максимального правдоподобия (ОМП) модуля межчастотного коэффициента корреляции, которая выполняется в соответствии со следующей формулой [2]

$$\hat{R}(\Delta F) = \frac{\left( \sum_{j=1}^N Z1_j * Z2_j^* \right)}{\left( \sum_{j=1}^N Z1_j * Z1_j^* \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^N Z2_j * Z2_j^* \right)} = \quad (1)$$

$$= \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N x1_j * x2_j^* + y1_j * y2_j^*\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N x2_j * y1_j^* + x1_j * y2_j^*\right)^2} \div \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N x1_j * x1_j^* + y1_j * y1_j^*\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N x2_j * x2_j^* + y2_j * y2_j^*\right)^2}$$

где  $\hat{R}$  – оценка модуля межчастотного коэффициента корреляции,  $N$  – число накоплений по независимым выборкам (обзорам РЛС),  $Z1_j = x1_j + iy1_j$ ,  $Z2_j = x2_j + iy2_j$  – комплексные выборки распознаваемых эхо сигналов на входе в двух частотных каналах. Квадратурные компоненты распознаваемых флюктуирующих сигналов имеют нормальное распределение, при этом без уменьшения общности подхода, так как данный алгоритм не чувствителен изменению мощности сигналов мешающих отражений, дисперсия их равнялась 1 и среднее 0.

Решение о том, что распознаваемый объект протяженный принимается, если

$$\hat{R}(\Delta F) \leq R_{пор} \tag{2}$$

Проиллюстрируем работу известного способа на конкретном примере, прибегнув как к аналитическому расчету, так и моделированию с помощью системы MATLAB [6]. Осуществим распознавание протяженного объекта, используя две выборки наблюдений с межчастотным коэффициентом корреляции равным  $R = 0$ . Корреляционный порог в расчетах будем менять от 0,1 до 0,9. Число независимых накоплений (обзоров) возьмем  $N = 8$  и 16.

Для нахождения вероятности правильного распознавания протяженного объекта по не превышению оценкой порога  $R_{пор}$  нужно воспользоваться распределением Уишарта. В работе [5] получено распределение оценки максимального правдоподобия (ОМП) для модуля межчастотного коэффициента корреляции из распределения Уишарта

$$W(\hat{R}) = 2(N-1)(1-\hat{R}^2)^{N-2} \hat{R}(1-R^2)^N \times \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\hat{R}R)^{2k} \Gamma(N+K)}{(1-\hat{R}^2 R^2)^{N+k} \Gamma(N-K) \Gamma^2(k+1)} \tag{3}$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма функция.

Для протяженных объектов  $R = 0$ , и распределение (3) можно представить в более простом виде

$$W(\hat{R}) = 2(\hat{R})(1-\hat{R}^2)^{N-2} (N-1), \tag{4}$$

Используя (4), можно получить формулу для вероятности правильного распознавания протяженных объектов, как вероятность не превышения порога

$$P(R_{пор}) = 1 - (1 - R_{пор}^2)^{N-1}. \tag{5}$$

Для верификации данной формулы было проведено моделирование с помощью системы MATLAB [6] коррелятора ОМП с расчетом для разных значений порога  $R_{пор}$  и  $N = 8$  и 16 (см. рис. 1 и 2, соответственно).

Результаты моделирования хорошо совпадают с аналитическими расчетами, что позволяет и для дальнейших исследований использовать моделирование.

Графики на рис. 1 и рис. 2 соответствуют независи-

мым выборкам наблюдения т.е. приему отраженных сигналов за несколько обзоров РЛС. Однако для повышения скорости принятия решения рассмотрим другой случай, когда для формирования модуля межчастотного коэффициента корреляции обрабатываются сигналы в виде коррелированной пачки импульсов на каждой частоте в одном обзоре.

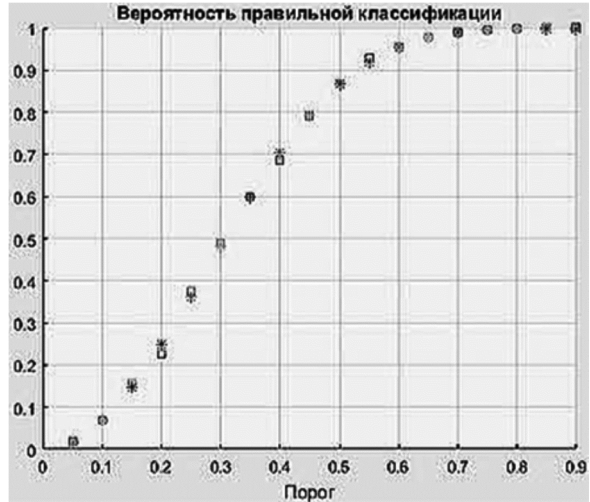


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного распознавания протяженных объектов от порога для  $N = 8$  в корреляторе с независимыми выборками наблюдений (звездочки – аналитика, квадраты – моделирование)

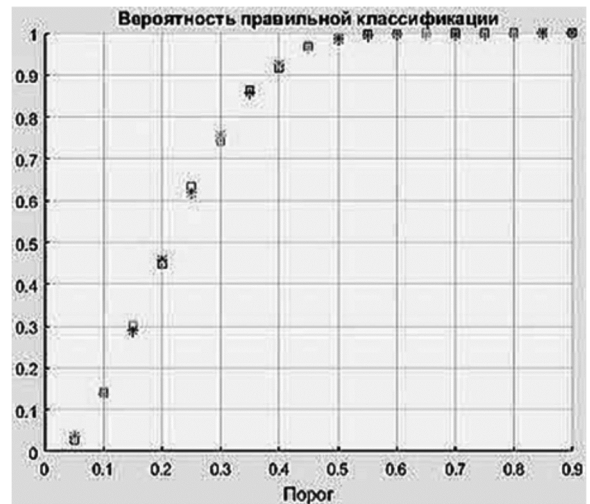


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного распознавания протяженных объектов от порога для  $N = 16$  в корреляторе с независимыми выборками наблюдений (звездочки – аналитика, квадраты – моделирование)

К сожалению, аналитически рассчитать вероятность правильного распознавания протяженного объекта в этом случае не представляется возможным и результаты были получены только моделированием в MATLAB. Для этого использовалась модель отраженных сигналов на каждой частоте в виде коррелированной пачки импульсов с нормально распределенными квадратурными составляющими. Межпериодный коэффициент корреляции задавался 0,9 для числа импульсов в пачке 8 и 16. Результаты моделирования представлены на рис. 3-4.

Результаты исследования полностью подтверждают, что коррелированность выборок наблюдения заметно

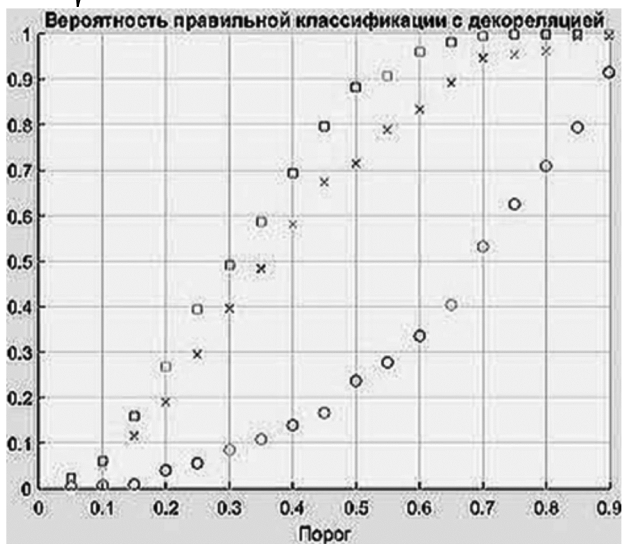


Рис. 3 Зависимость вероятности правильного распознавания протяженных объектов от порога для  $N = 8$  в корреляторе для не коррелированных выборок наблюдений (квадратики), для коррелированных выборок наблюдений с межпериодным коэффициентом корреляции 0,9 (кружки) и с использованием декорреляции (крестики)

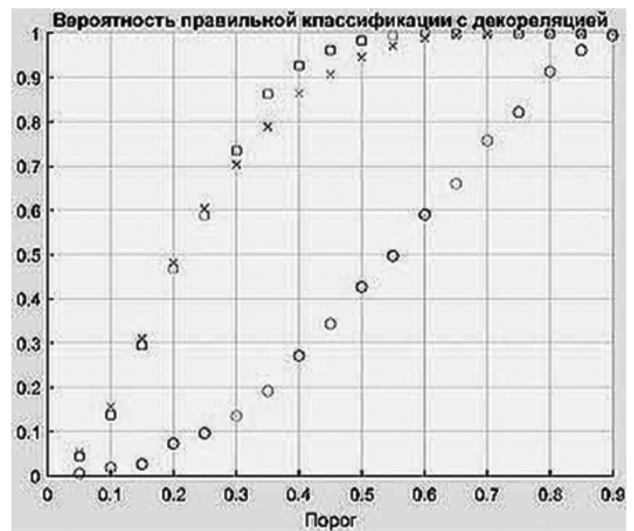


Рис. 4 Зависимость вероятности правильного распознавания протяженных объектов от порога для  $N = 16$  в корреляторе для не коррелированных выборок наблюдений (квадратики), для коррелированных выборок наблюдений с межпериодным коэффициентом корреляции 0,9 (кружки) и с использованием декорреляции (крестики)

снижает эффективность распознавания. Так при 16 коррелированных выборках наблюдений, с межпериодным коэффициентом корреляции 0,9, вероятность правильного распознавания для порога 0,4 падает с 0,9 до 0,3. Повысить эффективность распознавания при работе за один обзор можно в соответствии с предлагаемым способом с помощью декорреляции выборок наблюдения на каждой несущей частоте. Такая декорреляция была выполнена с помощью авторегрессионной КИХ фильтрации по алгоритму Берга.

Результаты моделирования с декорреляцией для авторегрессии третьего порядка представлены на рис. 3-4.

Результаты исследования полностью подтверждают, что применение декорреляции выборок наблюдения при работе в одном обзоре заметно повышает эффективность распознавания, при существенном повышении быстродействия этой операции. Так уже при 16 коррелированных выборках наблюдения с межпериодным коэффициентом корреляции 0,9 в одном обзоре декорреляция позволяет получить вероятность правильного распознавания практически такую же, как при использо-

вании независимых выборок за 16 обзоров.

#### Литература

1. Bartenev V. Radar objects classification using inter frequency correlation coefficient. Report on the International conference RADAR 2016. China, Oct. 2016
2. Бартенев В.Г. Патент «Способ классификации и бланкирования дискретных помех» № 2710894, Опубликовано: 14.01.2020, Бюл. № 2
3. Бартенев В.Г. О некоторых особенностях формирования межчастотного корреляционного признака // Современная электроника, 2021. №3,
4. Бартенев В.Г. Квазиоптимальные адаптивные алгоритмы обнаружения сигналов // Современная электроника, 2011. № 2,
5. Бартенев В.Г. О распределении оценки модуля коэффициента корреляции // Современная электроника, 2020. № 8,
6. Потемкин В.Г. «Справочник по MATLAB» Анализ и обработка данных. <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/chapter8/>