

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРЕХ СИГНАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ И БЛАНКИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ

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

THE USAGE OF THREE SIGNAL FEATURES FOR CLASSIFICATION AND BLANKING OF DISCRETE INTERFERING REFLECTIONS

Bartenev V.G.

A new method for the classification and blanking of discrete interfering reflections is proposed, based on the use of three signal features: Doppler velocity, inter-frequency correlation coefficient and an effective scattering surface.

Key words: doppler velocity, inter-frequency correlation coefficient, effective scattering surface.

Ключевые слова: дискретные мешающие отражения, доплеровская частота, межчастотный коэффициент корреляции, эффективная поверхность рассеяния.

Введение

Известен способ бланкирования сигналов дискретных мешающих отражений, основанный на формировании одного сигнального признака, так называемого скоростного, с классификацией, сигнала, отраженного от мешающего точечного объекта, имеющего малую радиальную скорость в данном элементе дальности [1]. Поэтому данный сигнал бланкируется, снижая поток ложных отметок на выходе приемного тракта РЛС. Основным недостатком данного способа является его низкая эффективность, обусловленная необходимостью использования для однозначного измерения скорости вобулированной пачки с ограниченным числом импульсов. Кроме того, попытка выставления максимально высокого скоростного порога для повышения эффективности данного способа приводит к росту вероятности бланкирования полезных целей с малой радиальной скоростью.

Более эффективным является двухчастотный способ классификации и бланкирования дискретных коррелированных помех. Данный способ строится на обработке отраженных сигналов на каждой несущей частоте РЛС в виде двух выборок наблюдения в каждом элементе дальности и включает в себя формирование оценок межпериодной доплеровской разности фазы с последующим их вычитанием для однозначного измерения скорости обнаруживаемого дискретного объекта [2]. Полученная таким образом оценка межчастотной межпериодной разности фазы сравнивается с фазовым порогом (фактически со скоростным порогом), на основании чего принимается решение о бланкировании отраженных сигналов от медленно движущихся мешающих точечных объектов, если этот порог оказался не превышен. Хотя данный способ позволяет осуществлять более эффективную классификацию сигналов благодаря более высокой точности оценки межпериодной

Предложен новый способ классификации и бланкирования дискретных мешающих отражений, основанный на использовании наряду с такими применяемыми сигнальными признаками как доплеровская скорость и межчастотный коэффициент корреляции еще и эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). По совокупности этих трех сигнальных признаков принимается решение о принадлежности принятых эхо сигналов в каждом элементе дальности к дискретным мешающим отражениям. Приведены результаты моделирования эффективности от добавления ЭПР признака к ранее применяемым двум сигнальным признакам.

разности фазы на каждой несущей частоте РЛС, из-за отсутствия вобуляции периодов повторения с использованием большего числа импульсов, тем не менее, и данному способу с одним сигнальным признаком свойственен недостаток бланкирования полезных целей с малыми радиальными скоростями.

Для исключения бланкирования полезных сигналов от целей с малыми радиальными скоростями для принятых на двух несущих частотах сигналов осуществляются как формирование оценок межчастотной межпериодной доплеровской разности фазы для однозначного измерения скорости объектов в каждом элементе дальности, так и формирование второго сигнального признака в виде модуля межчастотного коэффициента корреляции, который используется для оценки продольного размера классифицируемых объектов и который при не превышении порога классифицируется как мешающий сигнал по корреляционному признаку, при этом скоростному и корреляционному признаку для мешающих отражений ставят в соответствие логические единицы, совпадение которых фиксируют в каждом элементе дальности с помощью логической функции «И», на основании чего принимается решение о бланкировании отраженного сигнала в данном элементе дальности [3]. Хотя данный способ позволяет, используя скоростной и корреляционный признаки, повысить эффективность бланкирования мешающих отражений, однако не учет мощности отраженного сигнала может привести к ошибочной классификации, когда могут быть приняты за мешающие отражения сигналы от цели с малой ра-

диальной скоростью и большого размера, например, авиалайнер летящий с ракурсом по отношению к РЛС.

Новый способ классификации и бланкирования дискретных мешающих отражений

С целью исключения бланкирования полезных сигналов от целей с большой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), предлагается формирование третьего сигнального признака в виде оценки мощности принимаемых сигналов, которая сравнивается с порогом в каждом элементе дальности с присвоением при не превышении этого порога в конкретном элементе дальности признака сигнала мешающего отражения. И лишь после объединения корреляционного, скоростного, ЭПР сигнальных признаков, при их совпадении принимается решение о бланкировании отраженного сигнала в данном элементе дальности [4].

Рассмотрим более подробно формирование этих трех сигнальных признаков. Для однозначного измерения скорости обнаруженного объекта на каждой несущей формируется оценка межпериодной доплеровской разности фазы с последующим формированием межчастотной межпериодной разности фазы. Для классификации объектов по скоростному признаку можно воспользоваться известной оценкой аргумента межпериодного коэффициента корреляции. Алгоритм этой оценки, получаемой по пачке из N импульсов, может быть выражен в следующем виде

$$\hat{\gamma} = \arctg(\hat{s} / \hat{r}),$$

где $\hat{r} = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_i^* Z_{i+1})$, $\hat{s} = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Im}(Z_i^* Z_{i+1})$, Z_i – комплексные выборки наблюдений на одной несущей частоте.

Классификация объектов по скоростному признаку может быть реализована путем сравнения полученной оценки с порогом, соответствующим максимальной скорости движения мешающего объекта

$$|\hat{\gamma}| \leq \text{или} \geq \gamma_{\text{пор}}.$$

Использование такого одночастотного алгоритма классификации сопряжено с существенным недостатком – наличие неоднозначности оценки доплеровской фазы. Известно, что оценка γ связана с длиной волны λ излучения РЛС, частотой повторения импульсов F и радиальной составляющей скорости полета объекта V соотношением $\gamma = \frac{4\pi V}{\lambda F}$.

При относительно малых значениях частот повторения ($F = 300$ Гц-1000 Гц), которые используются в большинстве современных РЛС обнаружения, γ в несколько раз может превышать значение 2π даже в случае зондирования РЛС медленно движущегося объекта, в то время как функция арктангенса однозначно определена в интервале изменения фазы от 0 до 2π (или от $-\pi$ до π). Это может привести к увеличению вероятности ошибочной классификации скоростных и медленно движущихся объектов. Для устранения указанного недостатка в прототипе используются две не-

сущих частоты РЛС. Доплеровский набег фазы на каждой из несущих частот можно представить в виде:

$$\gamma_1 = \gamma_{10} + 2\pi k, \quad \gamma_2 = \gamma_{20} + 2\pi n, \quad \text{где } \gamma_{10}, \gamma_{20} - \text{ значения фазы в интервале однозначности } (-\pi, \pi), k, n = 0, 1, 2, \dots, \infty.$$

Определим межчастотную разность фазы: $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2 = \gamma_{10} - \gamma_{20} + 2\pi k - 2\pi n$.

Для небольшого разноса несущих частот (несколько % от несущей) $k = n$, получаем

$$\Delta\gamma = \gamma_{10} - \gamma_{20}, \quad \text{Разность } \Delta\gamma \text{ однозначно определена в пределах } (-\pi, \pi).$$

Таким образом, алгоритм однозначного измерения разности фаз $\Delta\hat{\gamma}$ будет

$$\Delta\hat{\gamma} = |\hat{\gamma}_{10} - \hat{\gamma}_{20}| \leq \gamma_{\text{пор}},$$

где $\hat{\gamma}_{10} = \arctg(s1 / r1)$, $r1 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_i^* Z_{i+1})$,

$$s1 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Im}(Z_i^* Z_{i+1}), \quad \hat{\gamma}_{20} = \arctg(s2 / r2),$$

$$r2 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_i^* Z_{i+1}), \quad s2 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Im}(Z_i^* Z_{i+1}).$$

Измеренная межчастотная разность межпериодной разности фаз сравнивается с порогом и при не превышении порога принимается решение, что отраженный сигнал может принадлежать к сигналам точечных мешающих отражений. Дополнительно использование двух несущих частот для однозначного измерения скорости дает возможность сформировать еще один сигнальный признак – признак классифицируемого объекта – межчастотный коэффициент корреляции. Как показано в работе [5], для классификации отраженных сигналов от объектов по их продольному размеру можно использовать характер флюктуаций отраженных сигналов на разных несущих частотах. В частности, в основе второго признака классификации в предлагаемом способе лежит взаимосвязь значения нормированного межчастотного коэффициента корреляции с линейными размерами объекта. Чем больше размер объекта, тем меньше межчастотный коэффициент корреляции. Если разнос несущих частот выбрать из условия

$$\Delta F \leq \frac{c}{4L_{\text{MAX}}}, \quad \text{где } L_{\text{MAX}} - \text{ максимальный разнос}$$

участков локального отражения вдоль линии визирования РЛС на классифицируемый объект при разных несущих частотах зондирующего сигнала, то величина межчастотного коэффициента корреляции $R(\Delta F)$ будет связана с размером объекта L выражением

$$R(\Delta F) = \cos\left(\frac{4\pi\Delta FL}{c}\right).$$

Как следует из этой формулы, с учетом [5], для того чтобы различить класс летательных аппаратов с малым продольным размером от класса медленно перемещающихся дискретных мешающих объектов, имеющих значительно большие размеры L , достаточно выбрать

разнос несущих частот ΔF порядка 10 МГц. Современные летательные аппараты имеют максимальный размер менее 75 метров, что значительно меньше разрешающей способности РЛС обнаружения, составляющей 150-300 метров, соизмеримой с размерами дискретных пассивных помех.

В этом случае для самого большого самолета, например, Эрбас А-380, размером в 72 метра межчастотный коэффициент корреляции равен

$$R(10 \text{ МГц}) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot 72}{3 \cdot 10^8}\right) = 0,86.$$

Для меньшего размера отечественного лайнера ИЛ-96-300 длиной в 55 метров

$$R(10 \text{ МГц}) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot 55}{3 \cdot 10^8}\right) = 0,92.$$

В то время как для 200 метрового мешающего объекта

$$R(10 \text{ МГц}) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot 200}{3 \cdot 10^8}\right) = 0,1.$$

Значит, выбрав разнос несущих не более 10 МГц и сравнивая корреляционный признак с порогом при его не превышении, формируется второй корреляционный признак отраженного сигнала, который может принадлежать к сигналам точечных мешающих отражений.

Следует отметить, что разнос несущих в 10 МГц хорошо согласуется с требованием однозначной оценки и скоростного признака, т.е. составляет несколько процентов от частоты несущих современных РЛС обзора.

Как и для первого скоростного признака, для формирования межчастотного коэффициента корреляции применим накопление оценки по пачке из N импульсов.

$$r = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_{1i}) \text{Re}(Z_{2i}) + \text{Im}(Z_{1i}) \text{Re}(Z_{2i}),$$

$$s = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_{2i}) \text{Im}(Z_{1i}) - \text{Im}(Z_{2i}) \text{Re}(Z_{1i}),$$

$$z1 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_{1i}) \text{Re}(Z_{1i}) + \text{Im}(Z_{1i}) \text{Im}(Z_{1i}),$$

$$z2 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_{2i}) \text{Re}(Z_{2i}) + \text{Im}(Z_{2i}) \text{Im}(Z_{2i}),$$

где Z_{1i} и Z_{2i} – комплексные выборки наблюдений на первой и второй несущей частоте. Тогда межчастотный коэффициент корреляции может быть вычислен по следующей формуле:

$$\hat{R}(\Delta F) = \frac{\sqrt{r^2 + s^2}}{\sqrt{z1z2}} \leq R_{\text{ПОР}}.$$

Порог ЭПР признака изменяется по дистанции для каждого элемента дальности в соответствии с уравнением дальности радиолокации для выбранного ЭПР мешающего отражения и конкретных параметров РЛС.

На данный порог подается усредняемый сигнал в каждом элементе дальности как по пачке сигналов в каждом частотном канале, так и их сумма. Оценка ЭПР по измерениям мощности принятого сигнала определяется по известной формуле уравнения дальности радиолокации [6]:

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 P_{np} R^4}{P_{nep} G^2 \lambda^2},$$

где σ – величина ЭПР; P_{np} – мощность принятого сигнала; P_{nep} – мощность передатчика; G – коэффициент усиления передающей (приемной) антенны; λ – длина волны РЛС; R – дальность до цели.

Третий сигнальный признак по ЭПР может быть получен путем суммирования мощностей сигналов z_1 и z_2 , используемых для нормирования оценки межчастотного коэффициента корреляции, т.е.

$$z1 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_{1i}) \text{Re}(Z_{1i}) + \text{Im}(Z_{1i}) \text{Im}(Z_{1i}),$$

$$z2 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_{2i}) \text{Re}(Z_{2i}) + \text{Im}(Z_{2i}) \text{Im}(Z_{2i}),$$

$$Z_1 + Z_2 < \sigma_{\text{нор}}.$$

Моделирование

Проиллюстрируем работу предлагаемого способа на конкретном примере, прибегнув к моделированию с помощью системы MATLAB [7]. Осуществим классификацию двух объектов движущихся на скорости от 10 до 180 метров в секунду, используя две выборки наблюдений в виде двух пачек импульсов с постоянным периодом повторения 0,001 сек., отраженных от объекта на разных несущих частотах 500 МГц и 510 МГц. Объекты имеют ширину спектра флюктуаций в несколько герц и большой продольный размер, характеризуемый межчастотным коэффициентом корреляции 0,1 (как цель, так и мешающий объект). Скоростной порог был задан в 100 м/с, и корреляционный порог составлял 0,5. Обработываемое число импульсов в пачке, на каждой несущей равнялось 8. Предположим что ЭПР цели $\sigma_1 = 5 \text{ м}^2$, а мешающего отражения ЭПР $\sigma_2 = 0,25 \text{ м}^2$. В общем виде из уравнения дальности радиолокации следует:

$$\sigma_1 = \frac{(4\pi)^3 P_{np1} R_1^4}{P_{nep} G^2 \lambda^2} = K P_{np1} R_1^4,$$

$$\sigma_2 = \frac{(4\pi)^3 P_{np2} R_2^4}{P_{nep} G^2 \lambda^2} = K P_{np2} R_2^4,$$

где $K = \frac{(4\pi)^3}{P_{nep} G^2 \lambda^2}$ – постоянный коэффициент, характеризующий параметры РЛС, P_{np1} , P_{np2} – мощность принимаемого сигнала на входе приемной антенны на дальности R_1 и R_2 соответственно.

Используя приведенные выше формулы, найдем отношение оценок ЭПР, сделанных на разных дальностях R_1 и R_2 :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{P_{np2} \cdot R_2^4}{P_{np1} \cdot R_1^4}.$$

Считая, что полезная цель и мешающие отражения находятся на одной дальности, можно видеть, что мощность принимаемых сигналов для выбранных ЭПР отличается в 20 раз. Возьмем дисперсию моделируемых квадратурных составляющих с гауссовым законом распределения для мешающих отражений равной 1,

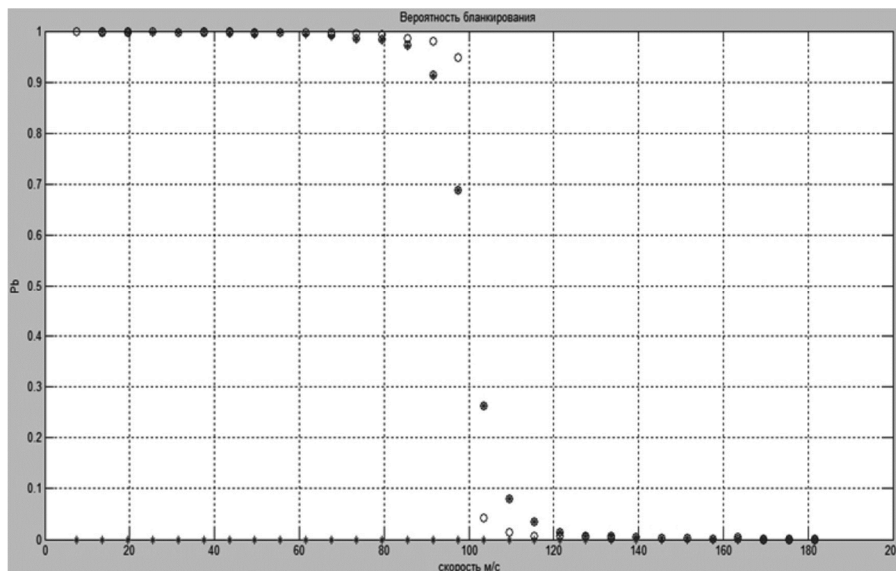


Рис. 1 Вероятность бланкирования узкополосных объектов для скоростного порога 100 м/с и корреляционного порога 0,5 в зависимости от скорости объекта с одинаковым продольным размером в 200 метров в зависимости от ЭПР. Кружочки на графиках соответствуют способу с двумя сигнальными признаками для ЭПР 0,25 м², ромбики способу с двумя сигнальными признаками для ЭПР 5 м², звездочки – способу с тремя сигнальными признаками для ЭПР 0,25 м², квадратiki способу с тремя сигнальными признаками для ЭПР 5 м²

а для цели в двадцать раз больше. Порог ЭПР выберем равным 2.

Результаты моделирования вероятностей бланкирования данных объектов в MATLAB с использованием трех сигнальных признаков (отмечены звездочками) и способа с двумя сигнальными признаками (отмечены кружочками), приведены на рис. 1, на котором приведена вероятность бланкирования с малым ЭПР мешающего отражения и с большим ЭПР полезной цели, имеющих большие продольные размеры (порог в 0,5 оценкой межчастотного коэффициента корреляции ими не превышен) и малые скорости. Вероятности бланкирования у мешающего отражения для сравниваемых способов совпадают, так как порог ЭПР мощностью их сигналов не превышен, а вот полезная цель с большой ЭПР не бланкируется. У способа с двумя сигнальными признаками из-за отсутствия признака ЭПР бланкируются как мешающие отражения, так и полезная цель. Иными словами, применение трех сигнальных признаков имеет явные преимущества.

Заключение

В статье рассмотрен новый способ классификации и бланкирования дискретных мешающих отражений, основанный на использовании трех сигнальных признаков: доплеровская скорость, межчастотный коэффициент корреляции и эффективная поверхность рассеяния (ЭПР). По совокупности этих трех сигнальных признаков принимается решение о принадлежности принятых эхо сигналов в каждом элементе дальности к дискретным мешающим отражениям. Приведены результаты моделирования эффективности использования трех сигнальных признаков. Таким образом, проведенное исследование, подтверждает положительный эффект от приме-

ния трех сигнальных признаков для классификации и бланкирования дискретных помех. Хотелось бы добавить, что использование двух частотного режима РЛС для применения предложенного способа предполагает, как одновременное излучение сигналов на двух несущих частотах, так и последовательное излучение двух пачек импульсов с перестройкой частоты от пачки к пачке.

Литература

1. Бартенев В.Г., Дракин Е.В. Цифровая система селекции движущихся целей. Авторское свидетельство №160321 по заявке №2285451 с приоритетом от 13 августа 1980 г. Опубликовано в бюл. №34 ФИПС 2018 г.
2. Бартенев В.Г., Галкин Р.Е. Синтез цифрового двухчастотного классификатора дискретных помех по скоростному признаку. Труды 16 Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2014», Москва, Т. 1, стр. 343-347, 2014.
3. Бартенев В.Г. Способ классификации и бланкирования дискретных помех. Патент № 2599870 по заявке №2015128907 зарегистрирован в Государственном реестре РФ 23.09.2016.
4. Бартенев В.Г. Способ классификации и бланкирования дискретных помех. Патент № 2710894 по заявке №2018134712 зарегистрирован в Государственном реестре РФ 14.01.2020.
5. Абраменков В.В., Климов С.А., Бондарев П.А., Юдин В.А., Гульшин В.А. Разрешение и распознавание радиолокационных объектов. Ульяновск: УлГТУ, 2012.
6. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника, т. 1, М.: «Советское радио», 1976, с.357, формула (1).
7. Потемкин В.Г. «Справочник по MATLAB» Анализ и обработка данных. <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/chapter8>.