

Новый способ классификации и бланкирования дискретных мешающих отражений

Владимир Бартнев (bartvg@rambler.ru)

В статье предложен новый способ классификации и бланкирования дискретных мешающих отражений, основанный на эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), которая используется наряду с такими сигнальными признаками, как доплеровская скорость и межчастотный коэффициент корреляции. По совокупности этих трёх сигнальных признаков принимается решение о принадлежности принятых эхосигналов в каждом элементе дальности к дискретным мешающим отражениям. Приведены результаты моделирования эффективности от добавления ЭПР-признака к двум ранее применяемым сигнальным признакам.

Известен способ бланкирования сигналов дискретных мешающих отражений, основанный на формировании одного сигнального признака, так называемого скоростного (с классификацией) сигнала, отражённого от мешающего точечного объекта, имеющего малую радиальную скорость в данном элементе дальности [1]. Сигнал бланкируется, снижая поток ложных отметок на выходе приёмного тракта радиолокационной системы (РЛС). Основным недостатком способа является 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 предложенного способа приводит к росту вероятности бланкирования полезных целей с малой радиальной скоростью.

Более эффективным является двухчастотный способ классификации и бланкирования дискретных коррелированных помех. Способ строится на обработке отражённых сигналов на каждой несущей частоте РЛС. Формируются две выборки наблюдений в каждом элементе дальности и выставляются оценки межпериодной доплеровской разности фазы с последующим вычитанием для однозначного измерения скорости обнаруживаемого дискретного объекта [2]. Полученная таким образом оценка межчастотной межпериодной разности фазы сравнивается с фазовым (фактически – со скоростным) порогом. Если порог не превышен, принимается решение о бланкировании отражённых сигналов от медленно движущихся мешающих точечных объектов.

Способ позволяет осуществлять более эффективную классификацию сигналов благодаря более высокой точности оценки межпериодной разности фазы на каждой несущей частоте РЛС. Тем не менее из-за отсутствия вобуляции периодов повторения с использованием большего числа импульсов, и данному способу с одним сигнальным признаком свойственен недостаток бланкирования полезных целей с малыми радиальными скоростями.

Чтобы исключить бланкирование полезных сигналов от целей с малыми радиальными скоростями, в принятых на двух несущих частотах сигналах оцениваются межчастотную и межпериодную доплеровскую разность фазы. Это позволяет однозначно измерить скорости объектов в каждом элементе дальности. Также для исключения бланкирования используются формирование второго сигнального признака. В этом случае задействуют модуль межчастотного коэффициента корреляции, который используется для оценки продольного размера классифицируемых объектов. Если коэффициент не превышает допустимого порога, сигнал классифицируется как мешающий по корреляционному признаку.

При этом скоростному и корреляционному признаку для мешающих отражений ставят в соответствие логические единицы, совпадение которых фиксируется в каждом элементе дальности с помощью логической функции «И», на основании чего принимается решение о бланкировании отражённого сигнала в данном элементе дальности [3]. Способ позволяет, используя скоростной и корреляционный признаки, повысить эффективность бланкирования меша-

ющих отражений. Однако неучтённая мощность отражённого сигнала может привести к ошибочной классификации. Тогда за мешающие отражения могут быть приняты сигналы от цели большого размера с малой радиальной скоростью. Например, от авиалайнера, летящего с ракурсом по отношению к РЛС.

Исключение бланкирования полезных сигналов от целей большого продольного размера с малыми радиальными скоростями достигается с помощью третьего сигнального признака – оценки мощности принимаемых сигналов, которая сравнивается с порогом в конкретном элементе дальности. Важное условие – непревышение порога признака сигнала в конкретном элементе дальности мешающего отражения. Лишь после объединения корреляционного, скоростного и ЭПР сигнальных признаков принимается решение о бланкировании отражённого сигнала в данном элементе дальности [4].

Рассмотрим более подробно формирование этих трёх сигнальных признаков.

Для однозначного измерения скорости обнаруженного объекта на каждой несущей частоте 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:

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

$$\text{где } \hat{r} = \sum_{i=1}^{N-1} \operatorname{Re}(Z_i^* Z_{i+1}), \quad \hat{s} = \sum_{i=1}^{N-1} \operatorname{Im}(Z_i^* Z_{i+1}),$$

Z_i – комплексные выборки наблюдений на одной несущей частоте.

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

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

Использование одночастотного алгоритма классификации сопряжено с существенным недостатком – неод-

нозначностью оценки доплеровской фазы. Известно, что оценка γ связана с длиной волны λ -излучения РЛС, частотой повторения импульсов F и радиальной составляющей скорости полёта объекта V соотношением:

$$\gamma = \frac{4 \times \pi \times V}{\lambda \times F}.$$

При относительно малых значениях частот повторения ($F = 300 \dots 1000$ 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 же время 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 несущих частоты РЛС. Доплеровский набег фазы на каждой из несущих частот можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \gamma_{10} + 2\pi \times k, \\ \gamma_2 &= \gamma_{20} + 2\pi \times n, \end{aligned}$$

где γ_{10}, γ_{20} – значения фазы в интервале однозначности ($-\pi, \pi$), $k, n = 0, 1, 2, \dots, \infty$.

Определим межчастотную разность фазы:

$$\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2 = \gamma_{10} - \gamma_{20} + 2\pi \times k - 2\pi \times n.$$

Для небольшого разнеса несущих частот (несколько % от несущей) $k = n$ получаем:

$$\Delta\gamma = \gamma_{10} - \gamma_{20}.$$

Разность $\Delta\gamma$ однозначно определена в пределах $(-\pi, \pi)$.

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

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

где

$$\hat{\gamma}_{10} = \arctg(s1 / r1),$$

$$r1 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Re}(Z_i^* Z_{i+1}),$$

$$s1 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Im}(Z_i^* Z_{i+1}),$$

$$\hat{\gamma}_{20} = \arctg(s2 / r2),$$

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

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

Измеренная межчастотная разность межпериодной разности фаз сравнивается с порогом. При непревышении порога отражённый сигнал можно считать принадлежащим к сигналам точечных мешающих отражений. Дополнительно использование двух несущих частот для однозначного измерения ско-

рости даёт возможность сформировать ещё один сигнальный признак. Признак классифицируемого объекта – межчастотный коэффициент корреляции.

Как показано в работе [5], для классификации отражённых сигналов от объектов по их продольному размеру можно использовать флюктуацию отражённых 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:

$$\Delta F \leq \frac{c}{4 \times L_{\text{MAX}}},$$

где L_{MAX} – 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:

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

Как следует из этой формулы [5], чтобы отличить класс летательных аппаратов с малым продольным размером от класса медленно перемещающихся дискретных мешающих объектов, имеющих ощутимо большие размеры L , достаточно выбрать разнос несущих частот ΔF порядка 10 МГц. Современные летательные аппараты имеют максимальный размер менее 75 м, что значительно меньше разрешающей способности РЛС обнаружения, составляющей 150–300 м и соизмеримой с размерами дискретных пассивных помех. Для большого самолёта, например Airbus A-380 размером 72 м, межчастотный коэффициент корреляции равен:

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

Для меньшего размера, например отечественного лайнера ИЛ-96-300 длиной 55 м:

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

Для 200-метрового мешающего объекта:

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

Значит, выбрав разнос несущих частот не более 10 МГц и сравнивая корреляционный признак с порогом при его непревышении, можно сформировать второй корреляционный признак отра-

жённого сигнала, который может принадлежать к сигналам точечных мешающих отражений.

Разнос несущих частот в 10 МГц хорошо согласуется с требованием однозначной оценки и скоростного признака, то есть составляет несколько процентов от частоты несущих современных РЛС обзора.

Как и для первого скоростного признака, для формирования межчастотного коэффициента корреляции применимо накопление оценки по пачке из N -импульсов:

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

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

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

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

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

$$\hat{R}(\Delta F) = \frac{\sqrt{r^2 + s^2}}{\sqrt{z1 \times z2}} \leq R_{\text{порог}}.$$

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 подаётся усреднённый сигнал в каждом элементе дальности как по пачке сигналов в каждом частотном канале, так и в сумме. Оценка ЭПР по измерениям мощности принятого сигнала определяется известной формулой уравнения дальности радиолокации [6]:

$$\delta = \frac{(4 \times \pi)^3 \times P_{\text{пр}} \times R^4}{P_{\text{нр}} \times G^4 \times \lambda^2},$$

где δ – величина ЭПР; $P_{\text{пр}}$ – мощность принятого сигнала; $P_{\text{нр}}$ – мощность передатчика; G – коэффициент усиления передающей (приёмной) антенны; λ – длина волны РЛС; R – дальность до цели.

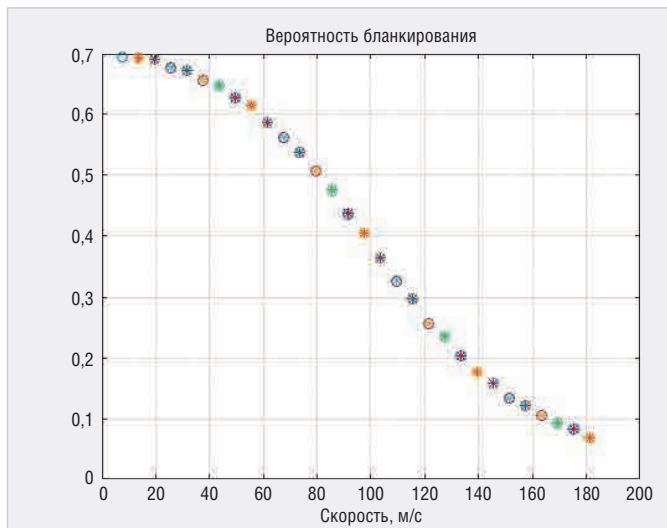
Для исключения бланкирования полезных сигналов с большой ЭПР предлагается использовать третий сигнальный признак. Он может быть получен путём суммирования мощностей сигналов z_1 и z_2 , используемых для нормирования оценки межчастотного коэффициента корреляции:

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

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

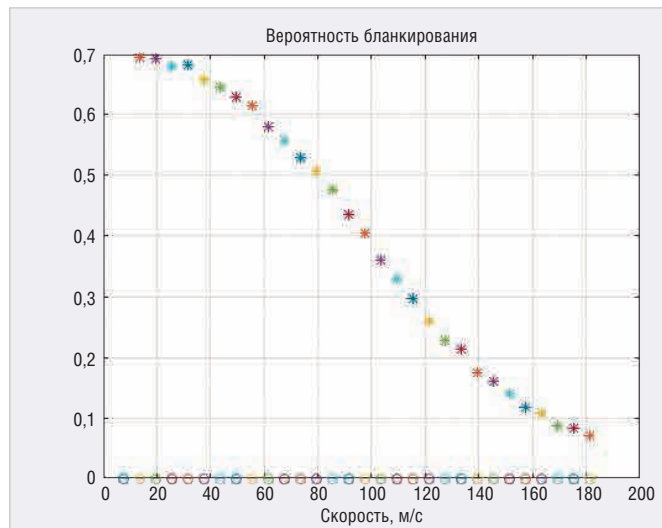
$$z_1 + z_2 < \delta_{\text{нор}}$$

Проиллюстрируем работу предлагаемого способа на конкретном приме-



Примечание: Кружочки на графиках соответствуют способу с тремя сигнальными признаками, звёздочки – способу с двумя сигнальными признаками.

Рис. 1. Вероятность бланкирования сигналов объекта для скоростного порога 100 м/с и корреляционного порога 0,5 в зависимости от скорости объекта с продольным размером 200 м и ЭПР=0,25 м²



Примечание: Кружочки на графиках соответствуют способу с тремя сигнальными признаками, звёздочки – способу с двумя сигнальными признаками.

Рис. 2. Вероятность бланкирования сигналов объекта для скоростного порога 100 м/с и корреляционного порога 0,5 в зависимости от скорости объекта с продольным размером 200 м и ЭПР=5 м²

ре, прибегнув к моделированию с помощью системы MATLAB [7].

Осуществим классификацию двух объектов, движущихся со скоростью от 10 до 180 м/с, используя две выборки наблюдений в виде двух пачек импульсов с постоянным периодом повторения 0,001 с, отражённых от объекта на разных несущих частотах: 500 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 100 м/с, корреляционный порог составлял 0,5. Обработываемое число импульсов в пачке на каждой несущей равнялось 8. Предположим, что ЭПР цели $\delta_1 = 5 \text{ м}^2$, а ЭПР мешающего отражения $\delta_2 = 0,25 \text{ м}^2$. В общем виде из уравнения дальности радиолокации следует:

$$\delta_1 = \frac{(4 \times \pi)^3 \times P_{\text{пр1}} \times R_1^4}{P_{\text{пер}} \times G^2 \times \lambda^2} = K \times P_{\text{пр1}} \times R_1^4,$$

$$\delta_2 = \frac{(4 \times \pi)^3 \times P_{\text{пр2}} \times R_2^4}{P_{\text{пер}} \times G^2 \times \lambda^2} = K \times P_{\text{пр2}} \times R_2^4,$$

$$K = \frac{(4 \times \pi)^3}{P_{\text{пер}} \times G^2 \times \lambda^2},$$

где K – постоянный коэффициент, характеризующий параметры РЛС; $P_{\text{пр1}}$, $P_{\text{пр2}}$ – мощность принимаемого сигнала на входе приёмной антенны на дальности R_1 и R_2 соответственно. Используя приведённые формулы, найдём отношение оценок ЭПР, сделанных на разных дальностях R_1 и R_2 :

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{P_{\text{пр2}} \times R_2^4}{P_{\text{пр1}} \times R_1^4}.$$

Считая, что полезная цель и мешающие отражения находятся на одной дальности, можно видеть, что мощность принимаемых сигналов для выбранных ЭПР отличается в 20 раз. Возьмём дисперсию моделируемых квадратурных составляющих с гауссовым законом распределения для мешающих отражений равной 1, а для цели – в 20 раз больше. Порог ЭПР выберем равный 2.

Результаты моделирования вероятностей бланкирования данных объектов в MATLAB с использованием трёх сигнальных признаков (отмечены звёздочками) и способа с двумя сигнальными признаками (отмечены кружочками) приведены на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 приведена вероятность бланкирования объекта с малой ЭПР, имеющего большие продольные размеры (порог 0,5 оценкой межчастотного коэффициента корреляции последними не превышен) и малую скорость. Вероятности бланкирования для двух способов совпадают, так как порог ЭПР мощностью принятых сигналов не превышен.

На рисунке 2 приведена вероятность бланкирования для объекта с большой ЭПР, большим продольным размером и малой скоростью. Для предлагаемого способа отражённые сигналы не бланкируются. У способа с двумя сигнальными признаками по причине отсутствия признака ЭПР бланкируются как мешающие отражения, так и полезная цель. Иными словами, предложенный способ имеет явные преимущества.

Проведённое исследование в системе MATLAB полностью подтверждает положительный эффект от применения трёх сигнальных признаков для классификации и бланкирования дискретных помех.

Литература

1. *Барфенев 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. *Барфенев В. Г., Галкин Р. Е.* Труды 16-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2014». Синтез цифрового двухчастотного классификатора дискретных помех по скоростному признаку. Т. 1. М., 2014. С.343-347.
3. *Барфенев В. Г.* Способ классификации и бланкирования дискретных помех. Патент № 2599870 по заявке № 2015128907 зарегистрирован в Государственном реестре РФ 23.09.2016.
4. *Барфенев 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. УлГТУ. 2012.
6. Справочник по радиолокации. Под ред. Скольника. Т. 1. М.: Советское радио. 1976. С. 357.
7. *Потёмкин В. Г.* Справочник по MATLAB. Анализ и обработка данных: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/chapter8/>.

18-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

Chip EXPO-2020

КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ПРОЙДЕТ

15-17.09

В ТЕХНОПАРКЕ ИННОВАЦИОННОГО ЦЕНТРА

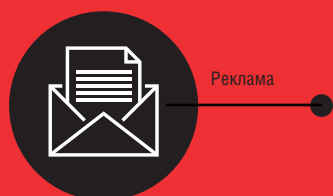
СКОЛКОВО



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ:

- Экспозиция Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, включая:
 - экспозицию предприятий, являющихся изготовителями изделий, включенных в единый реестр российской радиоэлектронной продукции (Постановление Правительства РФ №878),
 - экспозицию разработок, созданных в рамках государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы» (Постановление Правительства РФ №109),
 - экспозицию разработок, обеспечивающих выполнение приоритетных национальных проектов.
- Дивизионы кластера «Радиоэлектроника» ГК «Ростех»
- Квалифицированные поставщики ЭКБ
- Участники конкурса «Золотой Чип»
- Стартапы в электронике
- Консорциумы и дизайн-центры по электронике
- Корпорация развития Зеленограда

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



Реклама

ОРГАНИЗАТОРЫ:

ЗАО «ЧипЭКСПО» Москва, 121351, ул. Ярцевская, д.4. Тел.: +7 (495) 221-50-15
E-mail: info@chipexpo.ru <http://www.chipexpo.ru>