

*В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, С.В. СОЛОНСКАЯ, канд. техн. наук*

## МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИМВОЛЬНЫХ РАДАРНЫХ ОТМЕТОК МАЛОЗАМЕТНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА

### Введение

В задачах интеллектуальной обработки сигнальной радиолокационной информации используются подходы, основанные на вычислительном интеллекте [1, 2]. Это так называемые нечеткие преобразования, которые устанавливают связь между традиционными преобразованиями и системами нечеткого вывода, а в перспективе и с более мощными средствами вычислительного интеллекта. Предлагаемое нечеткое преобразование – это метод преобразования символьного изображения малозаметных нестационарных радарных отметок на основе эффекта Тальбота [3, 7, 8]. В данной работе показано, как этот подход может использоваться для анализа радиолокационных данных за счет различного представления флуктуаций символьных изображений для разных классов нестационарных радарных отметок. Во-первых, для автоматического обнаружения и распознавания объектов локации из анализа связей и функциональных (семантических) зависимостей между атрибутами (признаками) преобразованных символьных изображений; во-вторых, – для автоматического определения смысловых составляющих символьных изображений радарных отметок.

Преобразование на основе эффекта Тальбота является средством преобразования символьных изображений радарных отметок малозаметных подвижных и малоподвижных воздушных объектов с мерцающими межпериодными флуктуациями, приводящими иногда к полному замиранию сигнала. Это преобразование сводится к установлению определенного соответствия асимптотического равенства восприятия зрительных картин, произвольным образом меняющихся во времени и пространстве, в утверждение об условиях простого равенства восприятия радиолокационных изображений разной частоты флуктуаций.

Радиолокационные данные представляют собой смесь полезных, различных шумовых и мешающих отметок, то есть это нечеткие выборки и множества. Тогда имеется возможность использовать аппарат нечеткого преобразования [4, 5] для обнаружения функциональных зависимостей и связей среди смеси изображений отметок. Полученные зависимости и связи в виде символьных изображений групп сигналов или их следа (пачки) позволяют обнаруживать и распознавать воздушные объекты на фоне ложных сигнальных отметок.

### Эффект Тальбота при аппроксимации символьного изображения радарных отметок малозаметных воздушных объектов

В работе проанализирована возможность использования закона Тальбота для разработки и обоснования метода преобразования символьного изображения нестационарных радарных отметок малозаметных подвижных и малоподвижных воздушных объектов (ВО). Радиолокационные изображения радарных отметок малозаметных подвижных воздушных объектов могут иметь мерцающие межпериодные флуктуации, приводящие иногда к полному замиранию сигнала [1, 2]. Такое явление объясняется тем, что вторичное излучение реальных движущихся воздушных объектов рассматривается как вторичное излучение совокупности  $n \geq 2$  точек. При изменении положения воздушного объекта блестящие точки перемещаются. Их движение сводится к двум видам: поступательному движению к РЛС и вращательному относительно РЛС. На основании анализа воздействий этих движений изменение (флуктуацию)

огibaющей пачки можно пояснить: интерференцией (сложением) когерентных колебаний вторичных отражений от блестящих точек (рис. 1); эффектом Доплера для каждого из блестящих точек (рис. 2); понятием диаграммы обратного вторичного излучения (рис. 3).

Поясним вкратце эти явления. Пусть имеются две связанные блестящие точки летящего объекта, имеющие векторные скорости, одинаково направленные на РЛС, но различные по величине (рис. 1). Тогда центр системы (совокупности блестящих точек) поступательно дви-

жется со скоростью  $v_{rcp} = \frac{v_{r2} - v_{r1}}{2}$ , а вращение с угловой скоростью  $\left| \frac{d\theta}{dt} \right| = \frac{|v_{r2} - v_{r1}|}{l_1}$ . Таким

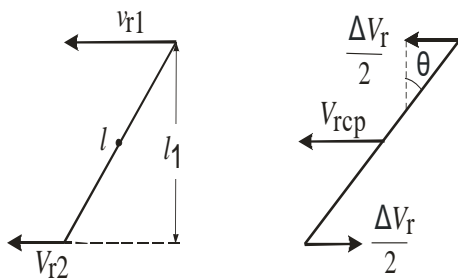


Рис. 1. Движения двух блестящих точек воздушного объекта

образом, при облучении воздушного объекта гармоническим колебанием отраженный сигнал представляет собой результат интерференции двух или больше колебаний, разность фаз которых непрерывно меняется. При этом будут меняться (флюктуировать) амплитуда и фаза результирующего колебания. Спектр сигнала расширяется.

Такие же выводы можно получить, основываясь на эффекте Доплера. Если  $v_{r1}$  и  $v_{r2}$  различны, то отличны и доплеровские частоты  $F_{d1} \neq F_{d2}$ .

Результирующее колебание имеет биения, и как результат появляются флюктуации огibaющей пачки импульсов отражений (рис. 2). Приведенная на рисунке величина периода флюктуации огibaющей пачки импульсов  $T$  обратно пропорциональна разности доплеровских частот  $\Delta F_d$  блестящих точек подвижного воздушного объекта и при длине волны несущей частоты  $\lambda_0$

$$T = T_{fl} = \frac{1}{|\Delta F_d|} = \frac{1}{|F_{d1} - F_{d2}|} = \frac{\lambda_0}{2|\Delta v_r|}. \quad (1)$$

К аналогичным выводам придем, заменяя совокупность блестящих точек подвижного воздушного объекта одним излучателем со сложной диаграммой направленности (ДН) вторичного излучения (рис. 3).

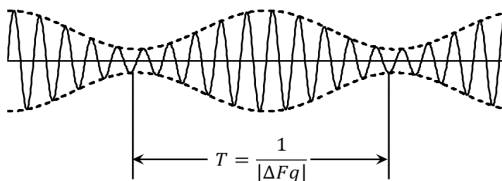


Рис. 2. Биения сигналов отражениями от двух блестящих точек воздушного объекта

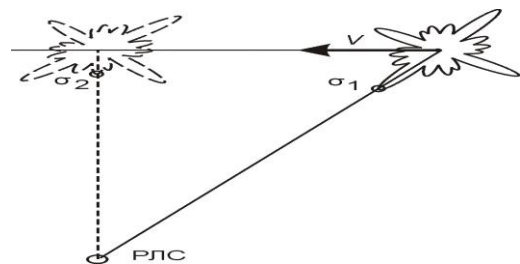


Рис. 3. ДН вторичного излучения подвижного воздушного объекта

Если угловая скорость поворота излучателей равна  $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$ , а интервал между лепестками диаграммы направленности равен  $\Delta\theta$ , то средний период флюктуации  $T_{fl} \approx \Delta\theta / \left| \frac{d\theta}{dt} \right|$ . Сводя воздушный объект к модели из двух блестящих точек (рис. 1), где  $l; 20\lambda_0$  при  $\lambda_0 = 0,1$  м и

$\cos\theta$ ;  $1 \Delta\theta = \frac{\lambda_0}{2l \cos\theta}$ ;  $\frac{\lambda_0}{2l} = 1/400$  рад. Величина угловой скорости поворота излучателей  $d\theta/dt$  определяется величинами скорости и радиуса разворота ВО  $d\theta/dt = v/R$  и ее величина ограничена с возникающей при развороте перегрузкой  $\mu = a/g = v^2/Rg$ , которая представляет собой отношение центростремительного ускорения  $a$  к ускорению земного притяжения  $g$ .

Если, например, для самолета  $\mu = 3$ ,  $v = 300$  м/с,  $R = 3$  км и  $d\theta/dt = 0,1$  рад/с.

Отсюда следует, что минимальный период флюктуации огибающей пачки принятых отражений от самолета  $T_{fl.m} = 1/40$  с.

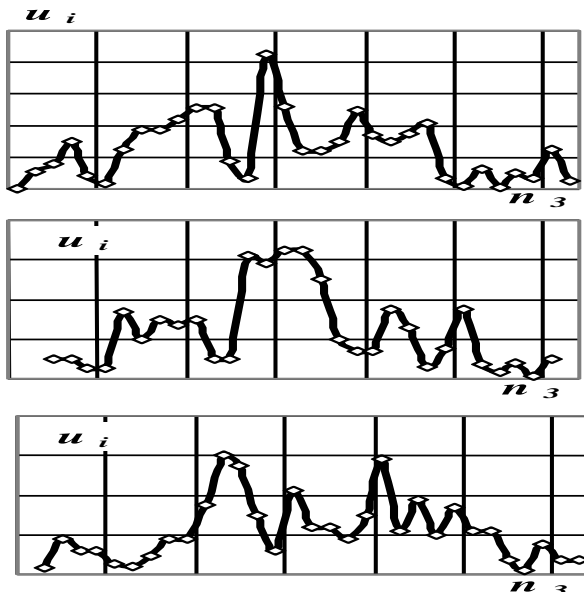


Рис. 4. Изображения отметок ангел-эхо

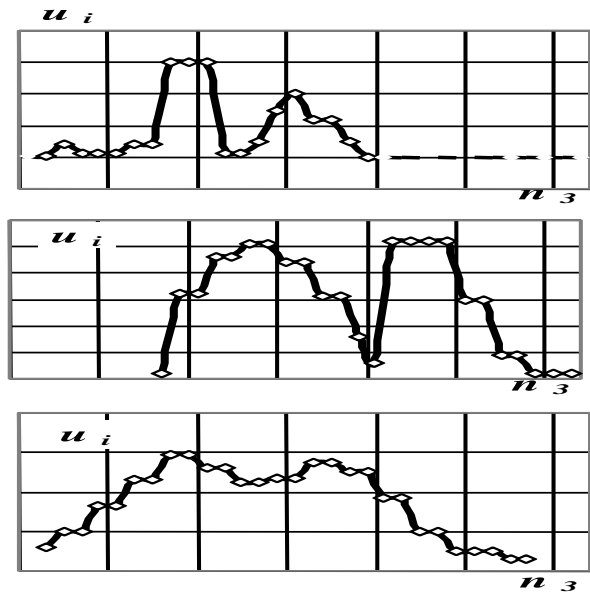


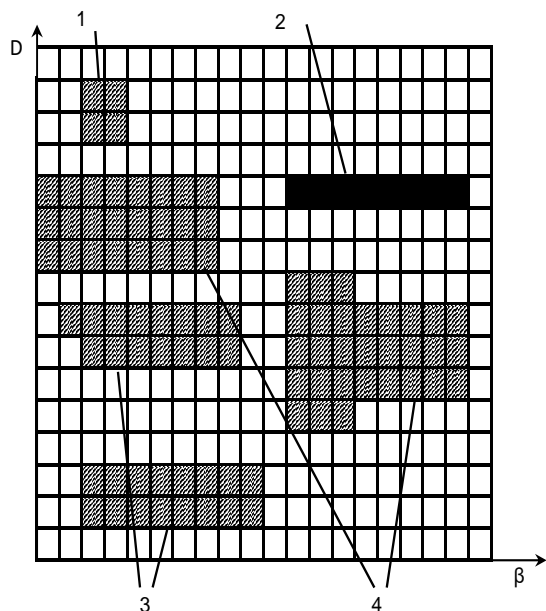
Рис. 5. Изображения отметок самолета

Такая особенность флюктуаций огибающей пачки принятых сигналов является дополнительным признаком для зрительного обнаружения и распознавания малозаметных подвижных и малоподвижных полезных (самолет, вертолет, БПЛ) и мешающих (например, «ангел-эхо») воздушных объектов.

### Принцип формирования символьной модели радарных отметок при обнаружении и распознавании малозаметных воздушных точечных объектов

В разработанную модель входят процедуры формализации и анализа символьной модели точечных подвижных объектов на основе алгебры предикатов [8 – 13] и операций, предназначенные для создания предикатной модели процессных знаний при обнаружении и распознавании воздушных точечных объектов. Символьная модель наблюдаемых точечных объектов формируется из набора (пачки) радиолокационных сигналов  $N$  информационных ячеек от каждого элемента зоны обзора. Обычно из полученных сигналов формируется карта или матрица данных. В нашем случае формируется символьная модель в виде пачки сигнальных отметок точечных объектов типа самолет, вертолет и БПЛА (рис. 6). Таким образом, обычная база данных превращается в базу знаний, в результате анализа которой можно и нужно получить требуемое решение. Рассмотрим особенности оцениваемых межпериодических информационных потоков. Формируемый массив данных представляет собой матрицу последетекторных амплитуд  $\|A\|$  размером  $M \times N$ . Для таких условий модель символа отметки точечного подвижного объекта будет определяться как совокупность пачки сигналов-отражений от объекта за время облучения его антенной РЛС. Пусть  $M = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{mn}\}$  – множество, представляющее собой матрицу  $\|A\|$  размерностью

$M \times N$ , состоящее из элементов  $k = m \times n$  – значений амплитуд сигналов в элементах обработки зоны обзора РЛС, а  $B$  – некоторое из его подмножеств  $B \subseteq M$ , амплитуды сигналов, которого  $q_{ij}$  превышают пороговые значения  $V_{ij}$ . Составляем набор логических элементов  $t_{ij}$  по следующему принципу: если  $q_{ij} \in B$ , то  $t_{ij} = 1$ ; если  $q_{ij} \notin B$ , то  $t_{ij} = 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ .



1 – импульсная помеха, 2 – точечный объект,  
3 – ангел-эхо, 4 – протяженный объект  
Рис. 6. Символьные изображения  
радарных отметок

Предикат  $A(x)$  на множестве  $M$ , соответствующий множеству  $B$  элементов обработки, превысивших порог, с характеристикой  $(t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{mn})$ , запишется формулой:

$$A(x) = t_{11}x^{q_{11}} \vee \dots \vee t_{mn}x^{q_{mn}} = \bigvee_{i=1, j=1}^{mn} t_{ij}x^{q_{ij}} \quad (2)$$

Выражение  $x^{q_{ij}}$  – форма узнавания события, когда  $x = q_{ij}$ , то  $x^{q_{ij}} = 1$ .

Предикатная модель процессных знаний о наблюдаемых воздушных или наземных объектах в общем виде – это система  $n$  унарных и бинарных предикатов  $Z_j$ :

$$M = \{Z_j, j = 1..n\}. \quad (3)$$

Такая система предикатов (атрибуты или предикатные признаки процесса) позволяет описать ситуацию вокруг анализируемой в данный момент информационной ячейки и процесс формирования

символьного изображения отметки из  $A(x)$  в течение нескольких циклов зондирования РЛС. Например, для РЛС обзора пространства это могут быть:

- унарный предикат  $Z_{p_{ij}}$  наличия сигнала в  $a_{ij}$  информационной ячейке;  $i, j$  – номера элементов зоны обзора РЛС;
- бинарный предикат  $Z_{d_{ij}}$  ухода сигнала в соседнюю по дальности ячейку  $a_{ij}$ ;
- бинарный предикат  $Z_{a_{ij}}$  перехода сигнала в смежную по азимуту ячейку, прилегающую к рассматриваемой ячейке.

Эти предикатные признаки формируются по следующим правилам:

$$Z_{p_{ij}} = 1, \text{ при } A_{ij} > 0 \quad (4)$$

$$Z_{d_{ij}} = 1, \text{ при } A_{i-1j} > 0 \wedge Z_{p_{ij}} = 1 \quad (5)$$

$$Z_{a_{ij}} = 1, \text{ при } Z_{p_{ij}} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0, \quad (6)$$

где  $A_{ij}$  – предикат события наличия-отсутствия сигнала в соответствующем элементе

На рис. 4 и 5 приведены реальные, экспериментально полученные картины пачек импульсов, отраженных от «ангел-эхо» и самолета. Анализ картин показывает, что радиолокационные изображения нестационарных сигнальных отметок типа отражений от малоаметных подвижных воздушных объектов и естественных мешающих отражений типа «ангел-эхо» могут иметь мерцающие межпериодные флуктуации, приводящие иногда к полному замиранию сигнала. Отсюда появляется возможность использовать закон Тальбота для разработки и обоснования метода преобразования символьного изображения нестационарных

радарных отметок малозаметных подвижных и малоподвижных воздушных объектов, для получения важных символьных (образных) характеристик и смысловых отличительных предикатных признаков для их эффективного обнаружения и распознавания.

Рассмотрим эти возможные символьные преобразования:

1. Для формирования символьного предикатного признака  $Z_{mij}$  пачки сигналов используется признак наличия сигнала  $Z_{a ij}$  в соседних по азимуту ячейках на продолжительности всей длительности пачки. Поскольку могут иметь случаи появления мерцающих межпериодных флуктуаций, приводящих иногда к полному замиранию сигнала, то могут возникнуть сбои при автоматическом формировании символьного предикатного признака  $Z_{mij}$  пачки сигналов. Для исключения таких случаев предлагается использовать алгоритм сглаживания мерцающих флуктуаций и основной эффект закона Тальбота. Эти преобразования сводятся к установлению определенного соответствия асимптотического равенства восприятия зрительных картин, произвольным образом меняющихся во времени и пространстве, к утверждению об условиях простого равенства восприятий зрительных (машинных) картин изображений радиолокационных отметок разной частоты флуктуаций.

2. Для формирования частотно-импульсного кода флуктуаций нестационарных радарных отметок типа «ангел-эх», используя который, можно получить символьную образную характеристику и смысловой отличительный предикатный признак для их эффективного обнаружения и распознавания.

После анализа экспериментальных данных удалось преобразовать формулировку известного обобщенного закона Тальбота [6] и превратить ее из утверждения об условиях асимптотического равенства восприятия зрительных картин, произвольным образом меняющихся во времени и пространстве, в утверждение об условиях простого равенства восприятий зрительных (машинных) картин изображений радиолокационных отметок разной частоты флуктуаций. Преобразованная формулировка обобщенного закона Тальбота имеет следующий вид.

Если отраженный сигнал от малозаметного объекта (МЗО)  $A(t)$  и периодически меняющийся во времени сигнал  $\{B(t)\}_{\omega \in (0, \infty)}$  удовлетворяют условию

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{t_1}^{t_2} B_{\omega}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt, \quad (7)$$

то найдется такая частота  $\omega_0 > 0$ , что для любого  $\omega > \omega_0$  восприятия картины сигнала  $B_{\omega}(t)$  совпадает с восприятием картины сигнала  $A(t)$ . Здесь  $t$  – время,  $A(t)$  и  $B_{\omega}(t)$  – изображения графиков (диаграммы) зависимости амплитуды сигнала от времени.

Для отраженного МЗО сигнала  $A(t)$  (рис. 7, а) можно построить семейство  $\{B_{\omega}(t)\}_{\omega \in (0, \infty)}$  амплитудно-частотной характеристикой (рис. 7, б), удовлетворяющей условию (7). Пусть ожидаемый сигнал отметки МЗО  $A(t)$  задан на интервале  $[0, T_0]$ . Полагаем

$$\omega = \frac{a_0 - a}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где  $a = \max_{0 \leq t \leq T_0} |A(t)|$ ,  $a_0 > a$ ,  $\varepsilon > 0$ . Строим последовательность моментов времени

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ , задавая их равенствами

$$\int_0^{\theta_1} (A(t) + a_0) dt = \varepsilon, \int_0^{\theta_2} (A(t) + a_0) dt = \varepsilon, \dots, \int_0^{\theta_m} (A(t) + a_0) dt = \varepsilon. \quad (9)$$

В качестве числа  $m$  принимаем наибольшее из натуральных чисел, удовлетворяющее условию  $\theta_m \leq T_0$ . В РЛС обзора воздушного пространства  $T_0$  – это длительность пачки принятых отраженных импульсных сигналов.

В моменты времени  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$  формируем короткие стандартные импульсы, каждый из которых охватывает площадь  $\varepsilon$ . Полученную последовательность импульсов, после ее смещения вниз на величину  $a_0$ , принимаем в качестве диаграммы сигнала отражений типа «ангел-эхо»  $B_\omega(t)$ . Диаграмму  $B_\omega(t)$  можно с достаточной точностью представить аналитически в виде

$$B_\omega(t) = -a_0 + \varepsilon \sum_{i=1}^m \delta(t - \theta_i) \quad (10)$$

Здесь  $\delta(t - \theta_i)$  – функция Дирака. Она задает импульс пренебрежимо малой длительности, возникающий в момент времени  $\theta_i$ , который охватывает единичную площадь. Диаграмму  $B_\omega(t)$  назовем асинхронным частотно-импульсным кодом радиолокационного сигнала отметок отражений типа «ангел-эхо»  $A(t)$ .

Физический смысл параметра  $\omega$  следующий. Это минимальная частота следования импульсов в асинхронном частотно-импульсном коде  $B_\omega(t)$  сигнала ДМО  $A(t)$ . Частоту  $\omega$  можно регулировать практически, изменяя величину площади  $\varepsilon$ , охватываемой каждым стандартным импульсом. Согласно формуле (8) уменьшение величины  $\varepsilon$  ведет к увеличению частоты  $\omega$ . В работе доказано, что множество  $\{B_\omega(t)\}_{\omega \in (0, \infty)}$  асинхронных частотно-импульсных кодов сигнала «ангел-эхо»  $A(t)$  удовлетворяет условию (7). Это означает, что для этого семейства кодов должно существовать критическое значение  $\omega_{кр}$  параметра  $\omega$ . Величину  $\omega_{кр}$  назовем критической частотой следования импульсов в коде  $B_\omega(t)$  сигнала  $A(t)$ .

Поскольку для формирования предикатного признака  $Z_{mij}$  пачки сигналов используется признак  $Z_{aij}$  соседней по азимуту ячейки, то осуществляется операция прогноза (экстраполяции) данного признака на следующее зондирование на соседнюю по азимуту информационную ячейку с учетом его предыстории. Основой для прогноза значения признака является либо его формирование при выполнении соответствующих условий (6), либо наличие ненулевого уровня признака для предыдущей ячейки, либо выполнение двух этих условий одновременно.

$$Z_{aij+1} = 1 \text{ и } Z_{aij} = 1 \vee (Z_{aij-1} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0 \wedge A_{ij} > 0). \quad (11)$$

Так как в прогнозной формуле (11) осуществляется проверка предикатов наличия сигнала в соседних по азимуту ячейках  $A_{ij-1} > 0 \wedge A_{ij} > 0$ , то предлагается на этом этапе внести изменения, позволяющие реализовать алгоритм сглаживания мерцающих флюктуаций, используя основной эффект закона Гальбота.

Идея в следующем: если не выполняется условие (11), а именно нет предиката сигнала в текущем зондировании РЛС  $A_{ij} = 0$ , то на место отсутствующего вставляется замещаемый сигнал с амплитудой, равной амплитуде предыдущей по азимуту ячейки, уменьшенной на величину  $c_s \varepsilon$  в соответствии с законом Табольта сигнал согласно формуле (9)

$$A_{ij-1} = 1 \wedge A_{ij} = 0 \text{ то } q_{sij} = q_{ij-1} - c_s \varepsilon. \quad (12)$$

Если при этом амплитуда сигнала  $q_{sij}$  превышает пороговое значение  $V_{ij}$ , то предикат наличия сигнала  $A_{ij}=1$ .

### Преобразования символьного изображения нестационарных радарных отметок для эффективного обнаружения и распознавания воздушных объектов

Предлагается метод преобразования символьного изображения нестационарных радарных отметок малозаметных подвижных и малоподвижных воздушных объектов для получения важных символьных (образных) характеристик и смысловых отличительных предикатных признаков для их эффективного обнаружения и распознавания. Сформулированы методы автоматического конструирования символьных изображений следования импульсов в асинхронном и синхронном частотно-импульсном коде.

Проведены работы по определению критической частоты  $\omega_{кр}$  для различных сигналов нестационарных отражений  $A(t)$  и их, асинхронных частотно-импульсных кодов  $B_{\omega}(t)$ . В эксперименте использовались записи реальных сигналов «ангел-эхо», полученных на обзорных РЛС сантиметрового диапазона. Определение  $\omega_{кр}$  повторялось десятикратно для каждого типа сигнала отражений. Среднеквадратичное отклонение для величины  $\omega_{кр}$  составило порядка 5 %. Рассматривались сигналы разной интенсивности от 2 до 48 дБ. При  $\omega > \omega_{кр}$  восприятие сигналов  $A(t)$  и  $B_{\omega}(t)$  совпадает. Критическая частота  $\omega_{кр}$  следования импульсов в асинхронном коде практически не зависит от вида сигнала, на нее влияет амплитуда и нижняя частота флуктуаций сигнала. Критическая частота для разных РЛС строго коррелируется с верхним пределом частоты следования импульсов зондирования.

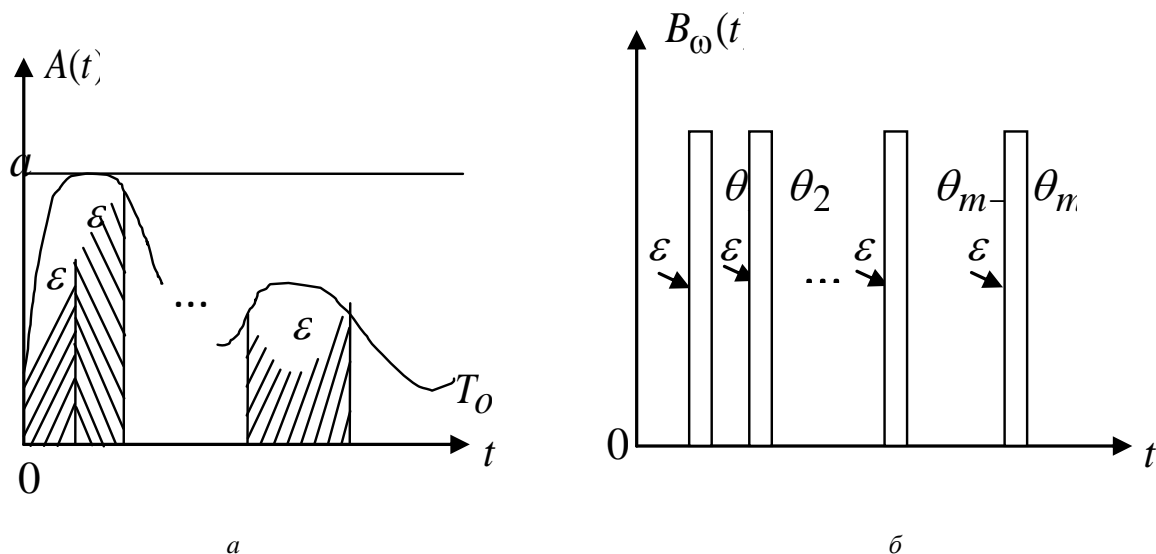


Рис.7. Вид сигнала «ангел-эхо» (а), символьное изображение частотно-импульсного кода (б), удовлетворяющее условию закона Гальбота

Асинхронные коды преобразованных символьных изображений невозможно ввести в память цифровой вычислительной машины без дополнительной их синхронизации. Для этого необходимо ввести дискретное время и так задержать каждый из импульсов кода, чтобы его передний фронт совпал с ближайшим дискретным моментом времени. Естественно ожидать, что неодинаковое смещение во времени импульсов кода  $B(t)$  в процессе его синхронизации может отразиться на характере воспроизведения синхронного кода  $C_{\psi}(t)$ . Поэтому возможен случай, когда, несмотря на одинаковое восприятие сигналов  $A(t)$  и  $B(t)$ , картины

$A(t)$  и  $C_{\psi}(t)$  могут быть разными. С другой стороны, ясно, что при увеличении частоты синхронизации  $\psi$  положение во времени синхронных импульсов кода  $C_{\psi}(t)$  будет все более приближаться к положению асинхронных импульсов кода  $B(t)$ . Следовательно, при устремлении к критической частоте синхронизации  $\psi_{кр}$  оба кода совпадут.

В ходе работы проведены эксперименты по определению величины  $\psi_{кр}$ . Частота синхронизации изменялась в пределах от 1 кГц до 20 кГц. Эксперименты показали, что величина  $\psi_{кр}$  определяется лишь максимальной частотой  $\omega_{\max}$  следования импульсов в сигнале  $B(t)$ , причем значения  $\psi_{кр}$  с высокой точностью укладываются в линейную зависимость от параметра  $\omega_{\max}$ . Таким образом, имеет место закономерность:

$$\psi_{кр} = \frac{1}{\alpha} \omega_{\max} . \quad (13)$$

Значения константы дискретности восприятия зрительных картин  $\alpha$ , как показывают выполненные опыты, лежат в пределах  $\alpha = (2,1 + 2,8) \cdot 10^{-2}$ . При недостаточно высокой частоте синхронизации сигнал  $C_{\psi}(t)$  воспринимается как сигнал  $B(t)$ , мелькающий на фоне шума.

### Выводы

Свойство символьных изображений нестационарных радарных отметок, в том числе, мешающих отражений типа «ангел-эхо», которое проявляется в виде межпериодных мерцающих флуктуаций и приводит иногда к полному замиранию сигнала, предлагается использовать как дополнительный признак для обнаружения и распознавания подобных отметок. Данный признак представляется в виде амплитудно-частотного кода, сформированного с использованием известной закономерности Тальбота для мерцающих картин для данного элемента обработки с учетом предыдущих циклов зондирований РЛС. В результате, можно отказаться от трудоемких операций формирования низкочастотного фильтра межпериодной обработки для защиты от нестационарных мешающих отражений типа "ангел-эхо" и решать эту задачу распознаванием преобразованных символьных изображений с помощью анализа амплитудно-частотного кода отраженного сигнала, формируемого согласно приведенному в статье алгоритму.

### Список литературы:

1. Сколник М.И. Справочник по радиолокации : в 2 т. ; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. Москва : Техносфера, 2014. 672 с.
2. Li Jian. Radar Signal Processing and Its Applications / Jian Li, R. Hummel, P. Stoica, E. G. Zelnio. Springer, 2013. 279 p.
3. Talbot H.F. Experiments on light. Phil. Mag., (third series), № 5. 1834. p. 321.
4. Теплов Б.М., Яковлева С.П. О законах пространственного и временного смещения цветов // Зрительные ощущения и восприятия. Т.2. Москва : Соцэкгиз, 1935.
5. Ильин В.Д., Соколов И.А. Символьная модель системы знаний информатики в человеко-автоматной среде // Информатика и ее применения. 2007. Т. 1 №1. С. 66-78.
6. Solonska S., Zhyrnov V. Adaptive semantic analysis of radar data using fuzzy transform (Book Chapter). Springer, 2020, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol 48. P. 157-179.
7. Zhuravlev Yu. I. Analysis of a training sample and classification in one recognition model / Yu. I. Zhuravlev, L. A. Aslanyan, V. V. Ryazanov // Pattern Recognition and Image Analysis: Pleiades Publishing, 2014. Vol. 24, Issue 3. pp 347–352. <https://doi.org/10.1134/S1054661814030183>.
8. Solonska S., Zhyrnov V. Adaptive semantic analysis of radar data using fuzzy transform (Book Chapter). Springer, 2020, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol. 48. P. 157-179.
9. Solonskaya S.V., Zhirnov V.V. Intelligent analysis of radar data based on fuzzy transforms // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz* and *Radiotekhnika*). 2018. 77 (15), pp. 1321-1329. |Scopus|0.69|



10. Solonskaya S.V., Zhirnov V.V. Signal processing in the intelligence systems of detecting low-observable and low-doppler aerial targets // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radio-tehnika). 2018. Vol. 77, Issue 20. P. 1827-1835.
11. Solonska S., Zhirnov V. Adaptive semantic analysis of radar data using fuzzy transform (Book Chapter). Springer, 2020, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol 48. P. 157-179.
12. Zhirnov V., Solonska S. PROCESS KNOWLEDGE BOUT OBSERVED OBJECTS IN INTELLECTUAL MONITORING SYSTEMS // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Issue 18, P. 1599-1607. [Scopus|0.69]. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.20.
13. Zhirnov V., Solonska S. INTELLIGENT SYSTEM FOR DETECTION OF LOW-VISIBLE AIR OBJECTS IN SURVEILLANCE RADARS // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Issue 17, P. 1513-1519. [Scopus|0.69]. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.20.

*Поступила в редколлегию 19.02.2021*

*Сведения об авторах:*

**Жирнов Владимир Витальевич** – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, в.н.с. НИЦ интегрированных радиоэлектронных систем и технологий, Украина; e-mail: [nauka123@ukr.net](mailto:nauka123@ukr.net)

**Солонская Светлана Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры естественных и гуманитарных наук, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина; e-mail: [solonskaya@ukr.net](mailto:solonskaya@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8841-7825>