

# Экспериментальные исследования выделения сигналов движущейся цели методом фоновой радиолокации

В. Е. Туров, А. Б. Силантьев, Е. М. Ильин, А. И. Полубехин, Д. Д. Узденов

Анализируются результаты экспериментальных исследований процесса выделения сигналов движущейся цели методом фоновой локации. Дано описание метода фоновой радиолокации и его физическая трактовка. Приведен пример натурного моделирования процесса выделения сигналов фоновой радиолокации на основе отражений от местного предмета. Показано, что для решения задачи обнаружения фоновой локации может быть использовано устройство обнаружения на основе технологий «Track-Before-Detect» (TBD).

*Ключевые слова:* фоновая локация, импульсное излучение, локация «на просвет», теневой силуэт, доплеровское смещение частоты, методы «Track-Before-Detect».

## 1. Введение

В основе метода фоновой радиолокации [1, 2] лежит регистрация теневой компоненты рассеянного поля объектов. Реализация метода (фоновый метод) возможна, когда за областью наблюдаемого объекта образуется и как бы проектируется на поверхность естественного фона (земная поверхность, лес, местные предметы) так называемая теневая область перераспределенной энергии, получаемой за счет излучения, поглощения и отражения радиоволн. В результате возникает возможность обнаружения малозаметных (малоразмерных) или слабоотражающих объектов. Выделение полезного сигнала основывается на обработке усредненного по времени сигнала фона. Обычно сигнал фона формируется подстилающей поверхностью, ограниченной площадью облучения диаграммой направленности антенны. При движении цели он дополнительно промодулирован сигналом от движущегося объекта. В настоящее время методы фоновой локации чаще всего рассматриваются для обнаружения в воздушном пространстве слабоотражающих объектов на фоне земной поверхности. Определенный интерес представляет и обнаружение таких объектов с борта космического аппарата: например, обнаружение летящих самолетов на фоне морской поверхности.

В основе метода фоновой локации лежит теория двухпозиционной (бистатической) и многопозиционной радиолокации [3–5]. В некоторых аспектах принцип работы систем фоновой локации аналогичен системам защиты от пассивных помех с внешней когерентностью [6]. Фон используется здесь в качестве источника опорного напряжения, и для эффективного выделения сигнала движущейся цели необходима компенсация сигнала фона.

Известен метод радиолокационного обнаружения воздушных объектов «на просвет» [5], основанный на регистрации теневого рассеянного поля объектов в двухпозиционных радиолокационных станциях и позволяющий обнаруживать малоразмерные и слабоотражающие цели. Этот метод предполагает нахождение цели между передающим и приемным пунктами

вблизи линии базы, практически передающее устройство относительно приемного вынесено за обнаруживаемый объект.

При фоновом методе радиолокации рассматривается однопозиционная радиолокационная станция (РЛС), содержащая совмещенные приемное и передающее устройства, и вынесенные отражатели естественного или искусственного происхождения в качестве вторичных излучателей электромагнитных волн [1, 2]. Такие «виртуальные передатчики» заменяют реальный передатчик двухпозиционной просветной РЛС [5]. Рассматриваемый метод реализует режим обнаружения «на просвет» при большом числе виртуальных «бистатических баз» в отличие от реальной многопозиционной просветной системы. Предполагается, что метод фоновой радиолокации может быть основан не только на вторичном излучении местных предметов зеркального и фацетного характера, но и на диффузном переизлучении земной поверхности [1, 2].

В настоящей работе наряду с общим описанием метода фоновой локации приводятся результаты натурного моделирования при использовании отражений от сосредоточенного местного предмета, а также некоторые рекомендации по обработке сигналов и выделению полезной информации при фоновой локации.

## 2. Описание, особенности и физическая трактовка метода фоновой радиолокации

Сущность предлагаемого метода обнаружения удобно пояснить на основе схемы экспериментальных исследований (рис. 1). На рисунке представлены пути распространения радиоволн в проекции на горизонтальную плоскость. Импульсное излучение (с длительностью импульса  $\tau_u$ ) и прием сигналов производятся приемной и передающей антеннами однопозиционной РЛС. На вход РЛС поступают отраженные радиопulses с задержкой, отвечающей некоторой дальности  $R$  ( $R > R_l$ , где  $R_l$  – дальность до цели), что позволяет использовать энергию, рассеянную в направлении цели местными предметами, находящимися в пределах импульсного объема  $c\tau_u/2$  (здесь  $c$  – скорость света). Рассеяние этой энергии в направлении точки приема происходит в соответствии с формой диаграммы вторичного излучения цели  $\sigma_u(\theta)$ .

Если в пространстве имеется вынесенный относительно точки приема вторичный излучатель электромагнитной энергии, возможна вторичная радиолокация цели «на просвет» по пути распространения радиоволн, отмеченном на рис. 1 стрелками.

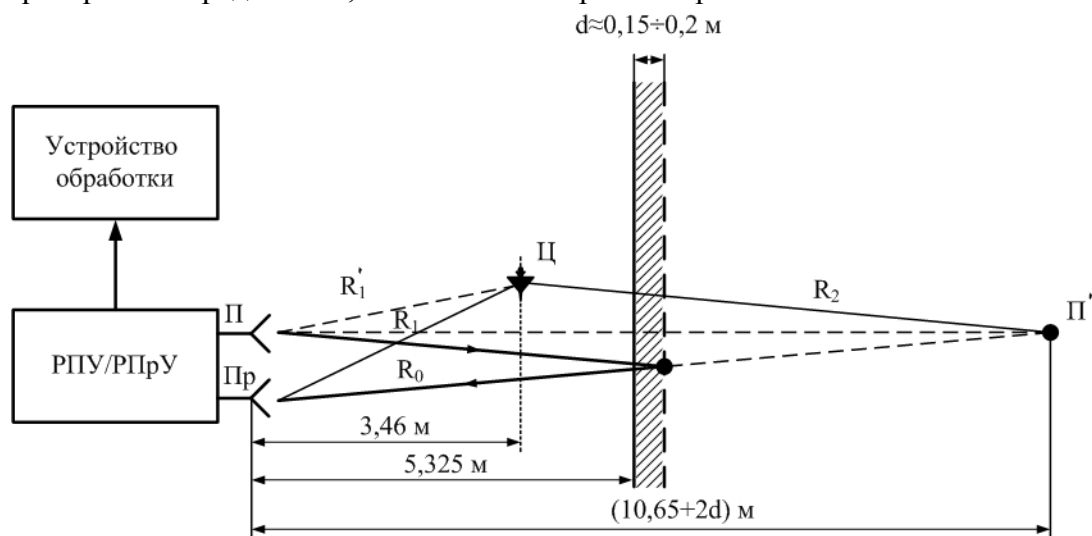


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования фоновой радиолокации

Когда цель находится вблизи линии визирования на отражатель, эффективная поверхность рассеяния (ЭПР), соответствующая бистатическому углу, близкому к  $180^\circ$ , резко увеличивается и определяется геометрической площадью  $S_T$  теневого силуэта воздушного объекта [1–3]. В конкретном импульсном объеме каждому из путей распространения радиоволн при движении цели соответствует свой доплеровский сдвиг частоты сигнала, что приводит к появлению в рассеянном объектом излучении непрерывной совокупности отличных по частоте доплеровских компонент спектра. Указанный спектр, как показывают расчеты, простирается выше частот, характерных для отражений от земной поверхности при отсутствии движущейся цели между отражателями и точкой приема. Это явление можно использовать для построения устройства обнаружения движущегося объекта.

Известны особенности метода фоновой радиолокации [3, 4]. В случае, когда цель приближается к линии визирования отражателя, эхо-сигнал фона (местного предмета, естественного препятствия и т.п.) претерпевает характерные изменения. Значение частоты Доплера цели в методе фоновой радиолокации при использовании переизлучения сосредоточенного отражателя отличается от типовых значений ширины спектра отражений от Земли, благодаря чему возможно выделение полезного сигнала. Когда траектории цели пересекают луч РЛС, происходит расширение спектра фонового сигнала. При движении цели вдоль луча доплеровская добавка частоты просветных сигналов близка к нулю, фоновый эффект маскируется отражениями от местности. Особенностью доплеровской селекции при фоновой радиолокации является необходимое увеличение времени накопления сигнала до значения, значительно превышающего значение времени накопления в классических (обычных) РЛС.

Измерение дальности до цели в данном методе по задержке невозможно, требуется использование специальных методов обнаружения/измерения. Анализ показывает, что при неподвижном луче и движении цели спектр полезного фонового сигнала изменяется по частоте в соответствии с формой теневой ЭПР аналогично тому, как это происходит в радиолокации «на просвет» [5].

### 3. Энергетические соотношения в задаче обнаружения объекта методом фоновой локации

Плотность падающего потока мощности вблизи отражателя (рис. 1) можно представить в виде [7]:

$$\Pi_1 = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}}{4\pi R_0^2}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{пер}}$  и  $G_{\text{пер}}$  – мощность передатчика и коэффициент усиления антенны на передачу. Плотность потока мощности переотраженной волны в точке расположения цели в момент пересечения линии визирования имеет вид:

$$\Pi_2 = \frac{\sigma_{\text{отр}} \Pi_1}{4\pi (R_0 - R_1)^2} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} \sigma_o S_{\text{отр}}}{4\pi R_0^2 (R_0 - R_1)^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{отр}}$  – величина ЭПР отражателя в направлении на цель,  $\sigma_o$  – удельная ЭПР отражателя,  $S_{\text{отр}}$  – площадь отражателя. Мощность излучения, рассеянного целью в направлении точки приема, вычисляется по формуле  $P_3 = \Pi_2 \sigma_{\text{ц}}$ , плотность потока мощности вблизи

приемной антенны РЛС –  $P_3 / (4\pi R_1^2)$ . Мощность сигнала цели на выходе приемной антенны с площадью  $A_{пр}$  принимает вид:

$$P_{ц}' = \frac{P_3 A_{пр}}{4\pi R_1^2} = \frac{P_{пер} G_{пер} \sigma_o S_{отр} \sigma_{ц} A_{пр}}{(4\pi)^3 R_0^2 R_1^2 (R_0 - R_1)^2}. \quad (3)$$

Эта мощность соответствует пути распространения электромагнитных волн «передатчик – отражатель – цель – приемник». Существуют различные возможные пути распространения электромагнитных волн (рис. 1):

- 1) передатчик – отражатель – приемник;
- 2) передатчик – отражатель – цель – приемник;
- 3) передатчик – цель – отражатель – приемник;
- 4) передатчик – цель – отражатель – цель – приемник.

Для путей 2 и 3 принимаемые сигналы соответствуют полученному ранее выражению (3) и практически одинаковы по мощности. Для пути 4 уровень сигнала, как правило, на 20–40 дБ меньше, чем для путей 2 и 3. Поэтому результирующая мощность имеет вид  $P_{ц} = 4P_{ц}'$ . Выражая площадь приемной антенны через коэффициент усиления и длину волны, для мощности и отношения сигнал/шум соответственно получим:

$$P_{ц} = \frac{4P_{пер} G_{пер} \sigma_o S_{отр} \sigma_{ц} \lambda^2 G_{пр}}{(4\pi)^4 R_0^2 R_1^2 (R_0 - R_1)^2}, \quad q^2 = \frac{P_{ц}}{\alpha_{ш} kT^0 \Delta f}. \quad (4)$$

Оценочные расчеты показывают, что максимальное отношение сигнал/шум весьма велико и собственные шумы не ограничивают возможностей обнаружения при использовании переотражений от местных предметов. В случае диффузного характера отражений от подстилающей поверхности отношение сигнал/шум по-прежнему остается достаточно высоким. При этом  $\sigma_{отр} = \Delta\beta_3 R \delta R \sigma_o$ , где  $\sigma_o$  – удельная ЭПР земной поверхности,  $\Delta\beta_3 R \delta R$  – площадь облучаемого участка земной поверхности,  $\Delta\beta_3$  – эквивалентная ширина луча антенны.

Основную сложность в случае фоновой локации представляет выделение сигналов теневого рассеяния на фоне мощных отражений от местных предметов. Косвенно соотношение мощностей этих сигналов можно оценить, сравнивая площадь теневого силуэта и площадь первой зоны Френеля эквивалентной двухпозиционной РЛС. Для случая, представленного на рис. 1, площадь первой зоны Френеля составляет  $S_1 \approx 0.25 м^2$ , а для используемой модели цели площадь теневого силуэта лишь  $S_T = hl \approx 15...25 см^2$ , то есть не более 1 % от площади первой зоны Френеля. Таким образом, в случае фоновой локации необходимо решать задачу обнаружения целей за счет эффективного выделения относительно малых флуктуаций фонового сигнала.

#### 4. Результаты экспериментального исследования выделения сигналов цели методом фоновой радиолокации

В ходе эксперимента, схема которого представлена на рис. 2, анализировались изменения фона, обусловленные перемещением сложного объекта локации (объект Ц на рисунке).

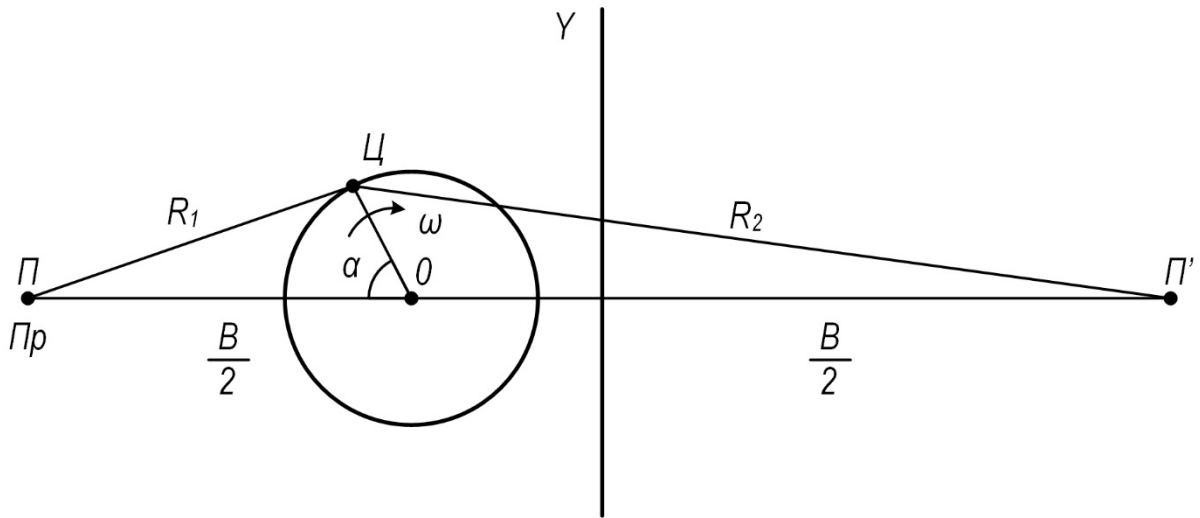


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

При локации «на просвет» чаще всего используется передающее устройство непрерывного действия, однако в этом случае сложно разделить собственное и теневое рассеяние. Поэтому исследования процесса выделения сигналов цели методом фоновой радиолокации проводились с использованием экспериментальной установки свехкороткоимпульсной радиолокации (СКИРЛ) [8]. Радиопульсы на частоте 9.77 ГГц длительностью  $\tau_{\text{и}} = 3 \text{ нс}$  излучались в направлении препятствия (внутренняя стена помещения из железобетона). Это позволило за счет временной селекции эффективно выделять сигналы от препятствия и исключить из обработки сигналы собственного рассеяния объекта локации. В целом действие РЛС для случая фоновой локации соответствует функционированию некоторой «эквивалентной» двухпозиционной РЛС с передающим пунктом в точке  $P'$ .

Ожидалось, что эхо-сигнал, отраженный от препятствия, при наличии на его фоне движущейся цели должен претерпевать характерную амплитудную модуляцию. С учетом схемы эксперимента и скорости перемещения объекта локации  $C$  частота сигнала амплитудной модуляции (изменения) фона в опыте не должна превышать единиц – десятков герц. Для фиксации таких изменений время наблюдения должно составлять единицы секунд. Следовало сопоставить эти изменения фона с движением объекта локации, выявив характерную частотно-временную зависимость для движущегося объекта локации.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить особенности и сложности практической реализации метода фоновой локации малоразмерных объектов. Результаты в виде совокупности разверток дальности, полученные в ходе эксперимента, представлены на рис. 3. Временная шкала по оси абсцисс соответствует максимальной дальности до объектов локации  $R \approx 11 \text{ м}$ .

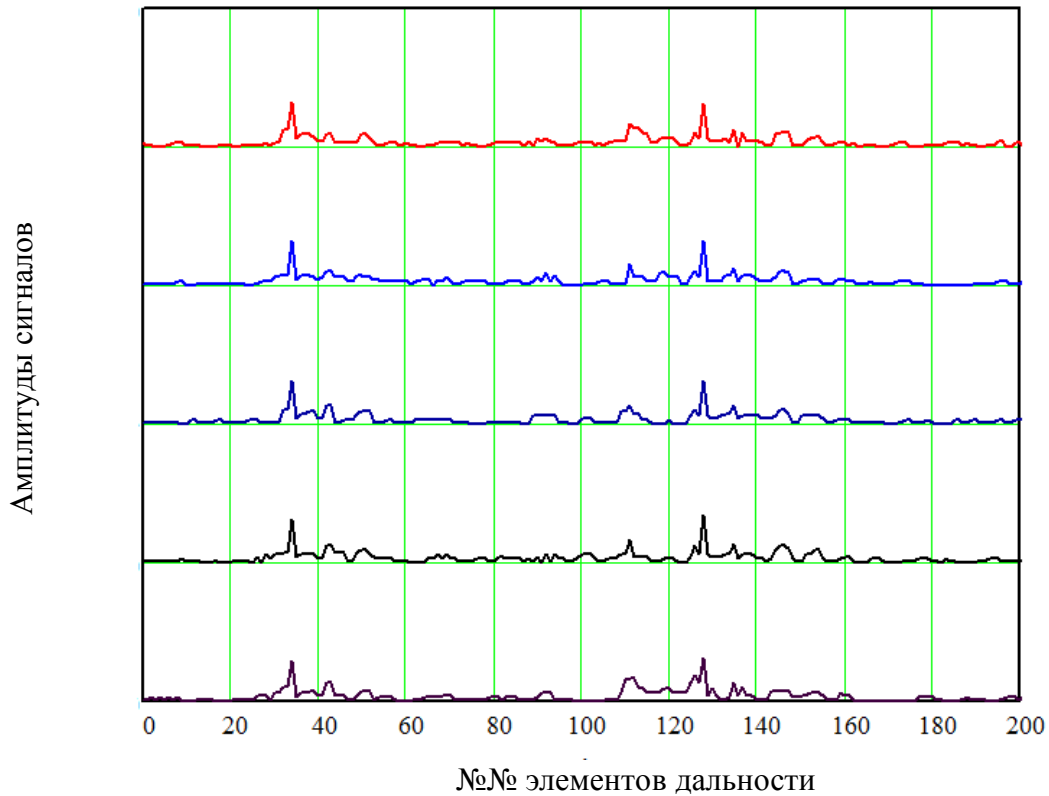


Рис. 3. Временные диаграммы сигналов на выходе приемного устройства СКРИЛ

Существуют определенные сложности обнаружения слабого сигнала амплитудной модуляции на столь значительном временном интервале. При обработке результатов эксперимента первоначально выделялась область, соответствующая дальности до отражающего местного предмета (в эксперименте интенсивный фоновый сигнал наблюдался от стены помещения). Для выделенной области амплитуды сигналов усреднялись. Таким образом, получался массив (набор) результатов измерений амплитуд отраженных сигналов  $A_i$ , соответствующих определенной дальности  $R$  во всех периодах зондирования. Для исключения флуктуаций амплитуды случайного характера полученный набор дополнительно подвергался медианному сглаживанию с использованием нескольких соседних измерений (при обработке использовалось суммирование 5 соседних значений). Результаты обработки представлены на рис. 4. В ходе эксперимента в течение 750 интервалов зондирования эхо-сигнал фона имел характерную амплитудную модуляцию.

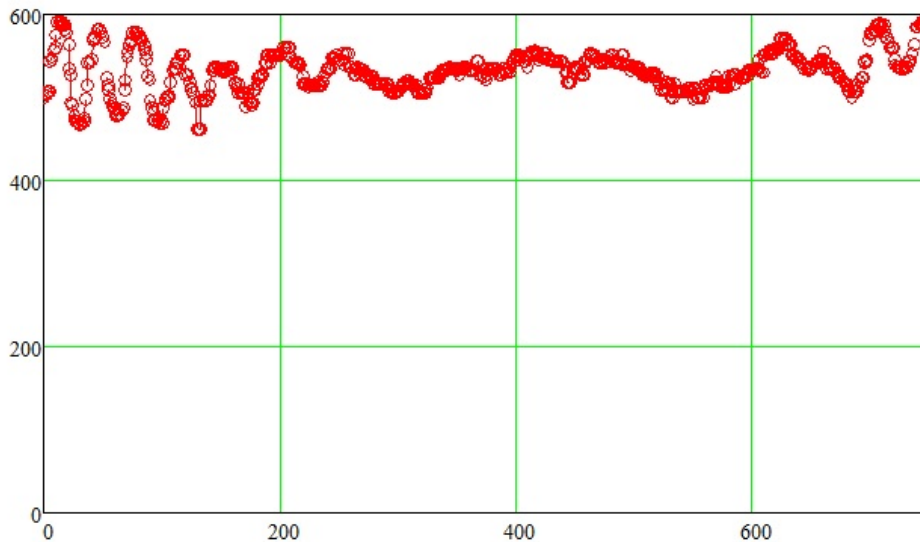


Рис. 4. Усредненные амплитуды сигналов, отраженных от препятствия (стена помещения, 124–136 элементы дальности, вертикальная поляризация передающих и приемных антенн) за 750 периодов зондирования

Далее в результате оконного Фурье-преобразования была получена спектрограмма изменений сигнала (дополнительно также выполнялась оконная весовая обработка по Хэммингу). Спектрограмма, представленная на рис. 5, характеризует изменение мгновенного спектра сигнала с течением времени.

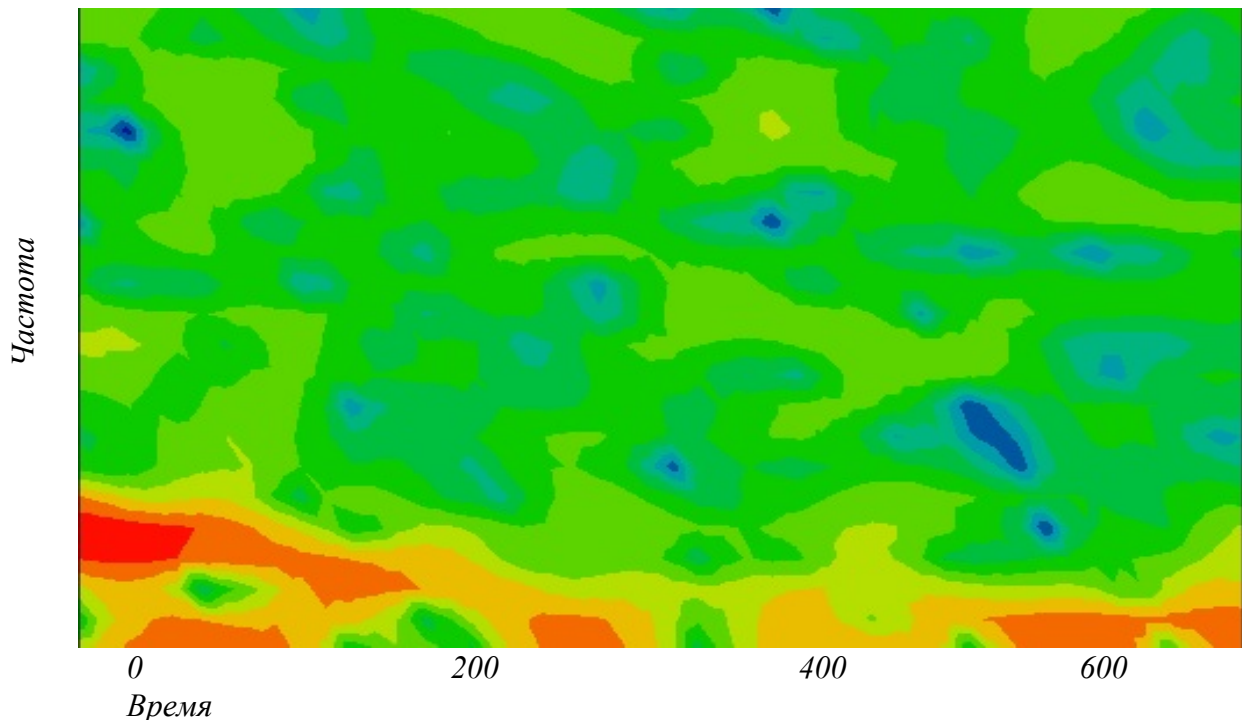


Рис. 5. Спектрограмма изменений амплитуды отраженного сигнала

Анализ показывает, что с течением времени частота изменений амплитуды фона уменьшается. Из анализа результатов, представленных на рис. 4, видно, что изменения амплитуды отраженного сигнала на участке времени 300–500 становятся крайне незначительными, то есть практически исчезают, при этом на спектрограмме (рис. 5) основная частота этого сигнала также уменьшается и на участке времени 300–500 стремится к нулю.

При вращении объекта локации в результате изменений фазовых соотношений фоновый сигнал претерпевал характерную модуляцию, так как происходила интерференция сигнала фона и эхо-сигнала объекта.

Необходимые расчеты при моделировании в среде MathCAD проводились без учета изменений амплитуды сигнала, отраженного от объекта локации, за счет диаграммы вторичного излучения, а также трансформации видимой области объекта при вращении, то есть учитывались лишь фазовые соотношения в результате изменения суммарной дальности  $R_1(t)+R_2(t)$ . Результаты расчетов представлены на рис. 6.

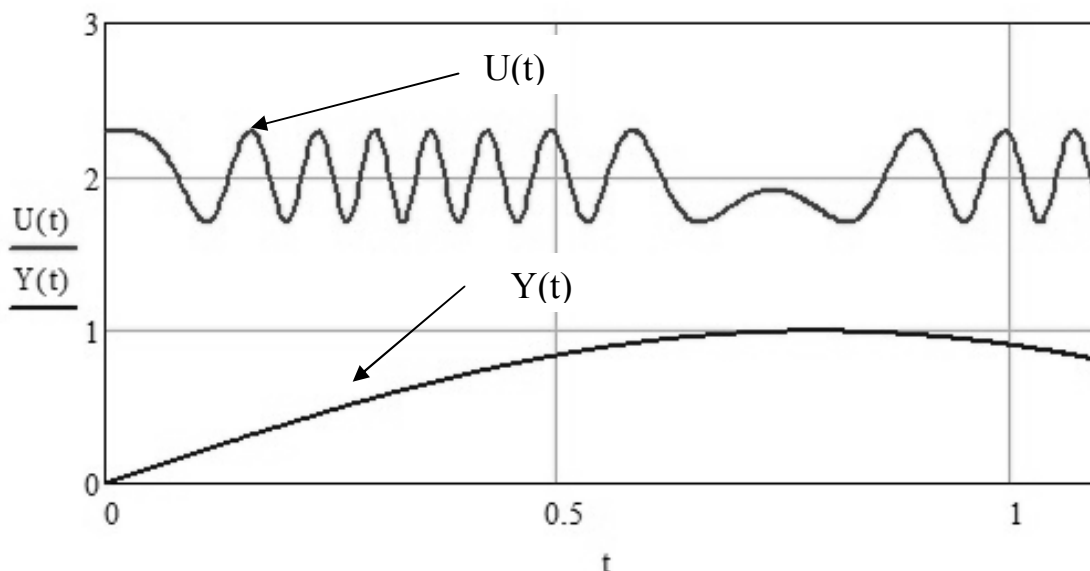


Рис. 6. Ожидаемое изменение амплитуды сигнала фона  $U(t)$  для различного положения объекта локации  $Ц$ ,  $Y(t)$  – изменение координаты объекта локации при его перемещении

Результаты математического моделирования, выполненного в среде MathCAD, в целом подтверждают результаты эксперимента. Возможность оценки изменения координаты объекта локации при его перемещении (рис. 6) позволяет использовать полученные результаты в алгоритмах выделения сигнала движущейся цели на фоне сигналов «подсвета» от местных предметов.

## 5. Методы выделения сигнала движущейся цели на фоне сигналов «подсвета» от местных предметов

Методы обнаружения фоновой локации в основном соответствуют методам обнаружения в «теневой области» эквивалентной двухпозиционной РЛС [5, 9]. На первый взгляд задача обнаружения практически ничем не отличается от классической задачи обнаружения в процессе выделения сигналов определенной формы на фоне мешающих. Однако вид сигнала (характер изменений интенсивности сигнала в пункте приема) во многом определяется размерами и конфигурацией теневого контура цели. Кроме того, сигнал формируется в процессе движения целей, а значит, зависит и от траекторий и параметров их движения. Поэтому при фоновой локации существуют особенности обнаружения, связанные, например, с априори неизвестной формой сигнала.

В бистатической РЛС эвристические алгоритмы обнаружения строят с учетом ожидаемой формы сигнала в пункте приема [5, 9, 10]. Рассматриваемые в большинстве работ устройства рассчитаны на обнаружение объектов, формирующих сигналы определенной формы. Например, рассматривается ситуация, когда заранее известные объекты локации (люди,



автомобили) перемещаются по поверхности Земли, тем самым создавая характерные изменения интенсивности прямого сигнала в пункте приема. Однако структура (форма) этих сигналов в зависимости от траектории движения объектов может существенно видоизменяться.

Задача обнаружения несколько упрощается, если РЛС предназначена для обнаружения объектов определенного класса, движущихся по предполагаемым траекториям. Например, в работах Д. М. Смирновой, А. В. Мякинкова [9, 10] предложены методы обнаружения сигналов целей, пересекающих линию базы двухпозиционной РЛС под углами, близкими к прямым. Рассматривается частный случай движения цели в зоне обнаружения бистатической РЛС по линейной траектории с постоянной скоростью. При этом отраженный от цели сигнал (в первом приближении) оказывается частотно-модулированным по линейному закону. Авторы [9, 10] предлагают несколько разновидностей обнаружителей таких сигналов. Фильтровая схема обработки состоит из полосового и дисперсионного (сжимающего) фильтров, корреляционная схема – из умножителя на опорный сигнал и интегрирующего устройства. Параметры фильтров должны быть согласованы с характеристиками сигналов, которые зависят от многих факторов, в том числе от траектории и параметров движения обнаруживаемых целей. Так как характеристики сигналов целей в значительной степени зависят от особенностей их движения, а траектория движения заранее неизвестна, оптимальная обработка предполагается многоканальной [9]:

- по дальности цели,
- по наклону траектории относительно линии базы,
- по скорости движения.

Во всех случаях, несмотря на используемую терминологию, речь идет лишь о характерных изменениях интенсивности сигнала в пункте приема и анализе этих изменений различными методами. Структура таких обнаружителей предполагает обязательное наличие амплитудного детектора на выходе высокочастотной части приемного устройства. Для рассматриваемых в [9, 10] обнаружителей время накопления сигнала в согласованном фильтре практически соответствует времени пребывания в зоне действия ДП РЛС. По сути, это означает, что обнаружение целей происходит только после факта пересечения этой зоны.

Большинство известных методов обнаружения в «просветной области» основаны на использовании в качестве зондирующего высокостабильного монохроматического сигнала. Однако при фоновой локации стабильность «прямого» сигнала может быть нарушена, что затруднит обнаружение целей, так как флуктуации сигнала в пункте приема могут быть обусловлены как наличием движущихся целей, так и замираниями самого сигнала фона.

Сигналы, отраженные от поверхности Земли, обусловленные наличием местных предметов или растительности, рассматриваются как фоновые. Изменение условий распространения, нестационарность фона (например, движущиеся под влиянием ветра ветки деревьев и т.п.) могут вызывать значительные флуктуации сигнала в пункте приема. Применительно к бистатической РЛС в работах [11, 18] проведен подробный частотно-временной анализ флуктуаций, предложены достаточно сложные теоретические и полуэмпирические модели отражений от подвижной растительности. По результатам исследований установлено, что спектр подобных флуктуаций, как правило, сосредоточен в достаточно узком частотном диапазоне (единицы герц).

Значительным флуктуациям сигнала фона способствует ситуация, когда РЛС находится на подвижном носителе, например, на борту летательного аппарата. Спектр флуктуаций при этом будет значительно расширяться. Как показывают оценочные расчеты, его отдельные составляющие в этом случае могут располагаться уже в диапазоне нескольких десятков герц.

Спектры анализируемых сигналов от целей и нежелательных амплитудных флуктуаций фона обычно перекрываются. Традиционная частотная режекция мешающих флуктуаций в этом случае недостаточно эффективна, а обнаружение малоскоростных малоразмерных целей усложняется. Получить приемлемые показатели качества обнаружения можно различными методами. Так, в упомянутых ранее работах А. В. Мякинкова и Д. М. Смирновой для

решения задач обнаружения на фоне мешающих сигналов предлагается реализовать накопление сигнала на значительном временном интервале за счет применения дисперсионных фильтров. В известных работах А. Б. Бляхмана и др. предусматривается последовательный многоэтапный анализ сигналов с выхода обнаружителя – устройства цифровой обработки на основе БПФ [5, 11]. В любом случае полностью реализовать потенциальную зону обнаружения малоразмерных целей и обеспечить требуемые показатели качества обнаружения можно лишь за счет увеличения времени наблюдения.

Как показано в [17], в случае фоновой локации, как и в ДП РЛС, необходимо решать единую задачу обнаружения – измерения, то есть принимать решение об отсутствии или наличии цели с одновременной оценкой информативных параметров, чаще всего доплеровской частоты, обусловленной движением цели. Принято различать [6] задачи обнаружения – измерения двух видов. В первом случае полагают, что измеряемые параметры не изменяются за время наблюдения. Задачу обнаружения – измерения второго вида решают в том случае, когда изменением измеряемых параметров за время наблюдения нельзя пренебречь.

Для решения единой задачи обнаружения – измерения в случае фоновой локации может быть использована совокупность технологий, известная как «Track-Before-Detect» (ТВД), то есть сопровождение (завязка трасс) до обнаружения отметок целей [11–15]. Задача заключается в том, чтобы использовать известные методы обработки изображений [22] для решения задачи обнаружения (завязки) трасс малоразмерных, малоскоростных целей для случая фоновой локации. Один из подходов к решению задачи предполагает поиск трасс в параметрическом пространстве. Лежащий в основе этого подхода алгоритм известен как преобразование Хафа [22]. Идея, лежащая в основе этого подхода, заключается в том, что для многих простых моделей движения целей отдельные наблюдения соответствуют отдельным областям или кривым в параметрическом пространстве.

Анализ метода обнаружения показывает, что его эффективность в целом соответствует методам цифрового накопления по критерию « $n$  из  $M$ ». Это позволит реализовать обнаружение малоразмерных целей на фоне флуктуаций сигнала «подсвета». Для целей локации возможна реализация алгоритма Хафа как с энергетическим накоплением, так и с бинарным накоплением [23]. Преобразование Хафа – один из непараметрических методов обнаружения в процессе завязки трасс за счет некогерентного накопления сигналов целей. Для обнаружения целей в ДП РЛС могут быть использованы и другие ТВД-методы, основанные, например, на преобразовании Радона. По своей эффективности методы фоновой локации, основанные на технологии ТВД, приближаются к известным методам цифрового накопления, а прирост в характеристиках обнаружения обеспечивается за счет существенного увеличения времени наблюдения.

## 6. Заключение

Сигнал фона вследствие изменения (поступательного движения или вращения) объекта локации может претерпевать характерные периодические амплитудные изменения.

При движении объекта локации закономерно изменяется и частота амплитудных флуктуаций фона.

Обнаружение движущихся объектов возможно по характеру изменения сигнала фона: например, по результатам анализа и обработки спектрограмм амплитудных флуктуаций фона.

Для обнаружения целей могут быть использованы ТВД-методы, основанные, например, на преобразовании Хафа или Радона. По своей эффективности эти методы фоновой локации приближаются к известным методам цифрового накопления, а требуемая эффективность обнаружения обеспечивается за счет существенного увеличения времени наблюдения.

## Литература

1. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
2. Алымов Ф. С., Розевиг В. В., Саблин В. Н., Чапурский В.В. Фоновая радиолокация как нетрадиционный метод обнаружения движущихся воздушных объектов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2004. № 4. С. 72–90.
3. Аверьянов В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. М.: Наука и техника, 1978. 148 с.
4. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
5. Бляхман А. Б., Рунова И. А. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации на просвет // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4, С. 424–432.
6. Теоретические основы радиолокации: Учебное пособие для вузов / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 326 с.
7. Патент GB 2240894 A (Великобритания). Метод обнаружения малозаметных самолетов / Р. Хауи [в пер. на рус. яз.] // New Scientist. 1991. V. 132. № 1792. P. 28.
8. Туров В. Е. Описание экспериментальной установки СКИРЛ // Вестник Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2013. Вып. 3. С. 33–41.
9. Мякиньюков А. В., Смирнова Д. М. Обнаружение наземных целей в многопозиционной просветной радиолокационной системе // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 5. С. 47–55.
10. Бляхман А. Б., Мякиньюков А. В., Рындык А. Г. Пространственно-временная обработка сигналов в бистатической просветной радиолокационной системе с антенной решеткой // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 6. С. 707–712.
11. Bistatic radar: emerging technology / ed. by M. Cherniakov. John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, 2008. 406 p.
12. Kramer J. D. R., Jr., and Reid W. S. Track-before-detect processing for an airborne type radar // IEEE International Radar Conference, 1990. P. 422–427.
13. Wei P. C., Zeidler J., and Ku W. Characterization of the performance of the track-before-detect approach to moving target detection // Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference, May 1992. P. 275–279.
14. Tonissen S. M., and Evans R. J. Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. V. 32, № 4, 1996. P. 1440–1451.
15. Tonissen S. M., and Bar-Shalom Y. Maximum likelihood track-before-detect with fluctuating target amplitude // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. V. 34, № 3, 1998. P. 796–809.
16. Wallace W. R. The use of track-before-detect in pulse-doppler radar // Radar, 2002. P. 315–319.
17. Силантьев А. Б., Красников А. В., Узденов Д. Д., Теряшов А. И. Обнаружение трасс целей в двухпозиционной радиолокационной станции // Вестник Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2013. Вып. 1. С. 46–51.
18. Gashinova M., Cherniakov M., Zakaria N. A., Sizov V. Model of Vegetation Clutter in Forward Scatter Radar Micro-Sensors // IEEE Radar Conference, 10–14 May, 2010. P. 899–904.
19. Монаков А. А. Обнаружитель движущейся цели для радиолокационного приемника на основе алгоритма Хафа // Сборник докладов конференции RLNC-2014. С.1584–1594.

20. *Kubica J.* Fast and robust track initiation using multiple trees [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cs.cmu.edu/~jkubica/papers/kubica\\_tr0462.pdf](http://www.cs.cmu.edu/~jkubica/papers/kubica_tr0462.pdf) (дата обращения: 14.01.2016).
21. *Силантьев А. Б., Красников А. В., Узденов Д. Д.* Постановка и методика решения задачи обнаружения-измерения в двухпозиционной радиолокационной станции при локации «на просвет» // Вестник Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2014. Вып. 3. С.30–34.
22. *Duda R. O. and Hart P. E.* Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures. *Communication of the ACM*, 15, 1, Jan., 1972. P. 11–15.
23. *Carlson B. D., Evans E. D., and Wilson S. L.* Search radar detection and track with the Hough transform. System concept // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 30, 1 Jan., 1994. Part I: P.102–108, Part II: P.109–115, Part III: P. 116–124.

*Статья поступила в редакцию 22.06.2016*

#### **Туров Виктор Евгеньевич**

д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий инженер научной лаборатории ИГТ ЯрГУ (150003, Ярославль, ул. Советская, д. 14), тел. (4852) 79-77-78, e-mail: victorturov@gmail.com.

#### **Силантьев Александр Борисович**

к.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ (150003, Ярославль, ул. Советская, д. 14), тел. (4852) 79-77-78, e-mail: silantiev@mail.ru.

#### **Узденов Дмитрий Дайирович**

преподаватель кафедры радиотехнических систем ЯрГУ (150003, Ярославль, ул. Советская, д. 14), тел. (4852) 79-77-78, e-mail: truebelief@list.ru.

#### **Ильин Евгений Михайлович**

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-68-46, e-mail: evgil45@mail.ru.

#### **Полубехин Александр Иванович**

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-68-46, e-mail: polub1980@mail.ru.

#### **Experimental research of moving target signal extraction by background radar**

**Victor E. Turov, Alexander B. Silantiev, Eugene M. Ilyin, Alexander I. Polubekhin, Dmitry D. Uzdenov**

In this paper, the results of experimental research of moving targets signal extraction by background radar are analyzed. The background method and its physical interpretation are described. An example of full-scale background radar signals simulation based on a permanent echo is given. It is shown that a detection device based on “track-before-detect” (TBD) may be used for background radar.

*Keywords:* background radar, pulse radiation, forward scattering radar, shadow figure, Doppler frequency shift, “track-before-detect” methods.