

УДК 621.396.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛООБРАЗОВАНИЯ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ

Сальников И.И., Чернышёв М.Н.

ГОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия», Пенза, e-mail: iis@pgta.ru

Выполнен анализ сигналообразования в двухпозиционных радиолокационных технических системах охраны, основанный на лучевой модели формирования интерференционной картины электромагнитных волн с использованием предположения о перекрытии нарушителем парциальных плоских волн в охраняемой зоне. Приведено аналитическое выражение для интерференционного множителя, который изменяется в пространстве по закону косинуса с квадратичным изменением фазы и имеет провал, характеризующий тень от нарушителя. Полученная модель позволяет оценить параметры нарушения, такие как расстояние, скорость перемещения и число нарушителей, для определения которых предлагается использовать вейвлет-преобразование.

Ключевые слова: сигналообразование, двухпозиционные радиолокационные технические системы охраны, интерференционный множитель

SIGNAL GENERATION MODELING IN RADAR TECHNICAL PROTECTION SYSTEMS

Salnikov I.I., Chernyshev M.N.

Penza State Technological Academy, Penza, e-mail: iis@pgta.ru

The analysis of signal generation in two-position radar technical protection systems has been carried out. This analysis is based on the radial model of forming an interference picture of electromagnetic waves with using the assumption about the trespasser's overlapping the partial plane waves in the protected zone. The obtained model makes it possible to evaluate the trespassing parameters, namely, the distance, the travel speed and the number of trespassers. For identifying these parameters wavelet transform is offered.

Keywords: signal generation, two-position radar technical protection systems

Настоящее время характеризуется усилением терроризма как по отношению к личности, так и по отношению к государственным объектам. В этой связи усиливается роль технических средств охраны (ТСО), которыми оборудуются объекты, а также рубежи и подходы к ним. При этом используется широкий спектр датчиков обнаружения, построенных на различных физических принципах. К ним относятся: обрывные, вибрационные, акустические, сейсмические, инфракрасные, волноводные, телевизионные и т.д. Широкое распространение получили радиолокационные (РЛ) ТСО. РЛТСО имеют целый ряд достоинств, основными из которых являются: отсутствие влияния погодных условий и стабильность характеристик, так как зондирующий сигнал формируется в самой РЛТСО.

Особенностью работы современных РЛТСО является использование **порогового обнаружения**, когда решение о наличии Н в ОЗ принимается на основе превышения принимаемого сигнала некоторого порогового уровня. Подобный метод обнаружения чрезвычайно прост и поэтому получил широкое распространение. Но пороговое обнаружение обладает рядом недостатков, основные из которых заключаются в появлении пропусков и ложной тревоги вследствие наличия шумов и помех, а также под воздействием животных, птиц, качающихся деревьев когда возможно ложное срабатывание РЛТСО.

Наибольшую важность представляет задача уменьшения ложной тревоги при пересечении ОЗ птицами и животными. В этом случае требуется **распознать, классифицировать Н**, что возможно сделать, применив дополнительную обработку, выявляя пространственную границу Н, то есть формируя в РЛТСО **радиоизображение**.

Целью данной работы является получение модели сигналообразования в двухпозиционных РЛТСО для выявления возможности по анализу параметров сигнала определить параметры движения нарушителя: скорости перемещения, поперечных размеров, дальности, а также числа нарушителей.

1. Формирование радиоизображения в РЛТСО

Теоретические и экспериментальные исследования возможности получения радиоизображений объектов с помощью радиолокационных средств начались еще в 70-х годах прошлого столетия [1] и интенсивно ведутся в настоящее время. Для формирования изображения необходимо зарегистрировать пространственное амплитудно-фазовое распределение (АФР) ЭМ-волн в плоскости ПРМ. При восстановлении радиоизображение будет иметь вид теневого силуэта – **тень на светлом фоне**. Лобовым решением поставленной

задачи может являться использование антенной решетки в плоскости регистрации параметров электромагнитного поля с поочередным электронным подключением отдельных элементов антенной решетки ко входу регистрирующего устройства в виде электрического сканирования, что приведет к сложности и высокой стоимости системы. Возможным решением, характеризующимся простотой реализации для формирования радиоизображения H в двухпозиционных РЛТСО, является использование **перемещения** H по поверхности земли в ОЗ. При этом необходимо осуществлять регистрацию во

времени значения комплексной амплитуды поля $\dot{E}(P, x_R, t)$ в точке P неподвижной приемной антенной, как функции координаты x_R перемещения H по направлению, ортогональному направлению ОЗ. РЛТСО работают обычно в диапазоне радиоволн не ниже дециметрового. Обнаружение H осуществляется в пределах прямой радиолучевой видимости. При этом наибольшее распространение получили двухпозиционные РЛТСО, которые состоят из приемника (ПРМ) и передатчика (ПРД), размещаемых на противоположных сторонах участка рубежа охраны (рис. 1).

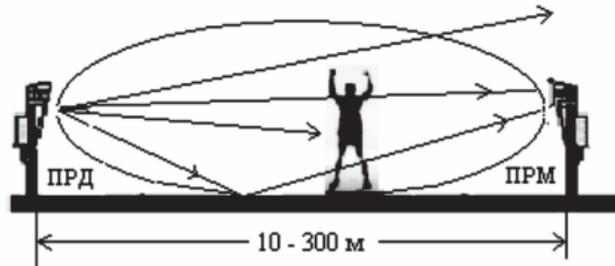


Рис. 1. Двухпозиционная РЛТСО

На вход ПРМ попадают парциальные ЭМ-волны, прошедшие различным путем в охраняемой зоне (ОЗ), включая отраженные от земли. Преодолевая зону охраны, нарушитель (H) вносит возмущение в парциальные ЭМ-волны, при этом основой взаимодействия объекта и ЭМ-волн является **дифракция**.

На входе ПРМ наблюдается **интерференция** парциальных волн, которая изменится при проходе H в ОЗ. По изменениям принимаемого временного сигнала судят о появлении H в ОЗ.

2. Лучевая модель формирования интерференционной картины ЭМ-волн в двухпозиционных РЛТСО

На рис. 2 представлены основные положения лучевой модели формирования интерференционной картины ЭМ-волн с использованием предположения о **перекрывании** H парциальных плоских волн в ОЗ для двухпозиционных РЛТСО. Для реально используемых в РЛТСО длин волн $\lambda = 1 \dots 10$ см, при которых размеры H намного больше λ , наиболее удачным допущением об изменении ЭМ-волн в области появ-

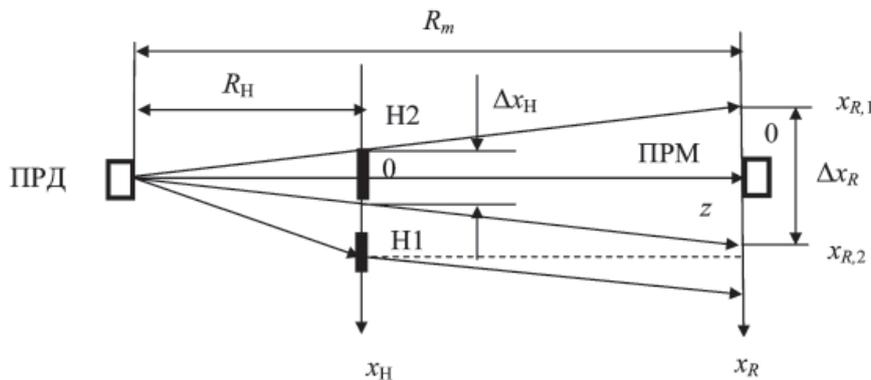


Рис. 2. Определение разности хода и формирование тени

ления H является поглощение ЭМ-волны на трассе распространения, то есть перекрывание парциальной волны. В отсутствии

H в точке ПРМ устанавливается суммарная волна с квазистационарным (на короткое время) состоянием начальной фазы:

$$\dot{E}_{\text{ПРМ}} = \sum_i \dot{E}_i e^{j\varphi_i} = \dot{E}_\Sigma \psi(\Delta\varphi) e^{j\varphi_\Sigma} = \dot{E} \cos(\Delta\varphi) e^{j\varphi}, \quad (1)$$

где $\dot{E}e^{j\varphi}$ – комплексная амплитуда ЭМ-волны; $\psi(\Delta\varphi)$ – интерференционный множитель, зависящий от фазового сдвига $\Delta\varphi$ плоских волн.

При сложении плоских ЭМ-волн наблюдаются случаи синфазного сложения, когда $\Delta\varphi = 2n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ и в результате сложения наблюдается пучность ЭМ-волны, а также случай противофазного сложения при $\Delta\varphi = \pi(2n + 1)$, когда будет наблюдаться узел суммарной ЭМ-волны.

При пересечении Н ОЗ будет наблюдаться последовательное перекрытие лучей – плоских волн, которые будут вычитаться из суммарной волны. Так как относительные сдвиги фазы перекрываемых плоских волн могут иметь весь диапазон значений от 0 до 2π и более, то мы будем наблюдать изменение состояния суммарной волны от нулевого уровня (узлы суммарной волны) до максимального уровня (пучности суммарной волны).

Приняв подобную модель сигналообразования для РЛТСО, мы можем связать параметры огибающей высокочастотного сигнала со скоростью движения нарушителя, а также с местоположением его перехода. На рис. 2 представлена схема определения разности хода для направления, проходящего через точку на оси $0x_H$, где находится нарушитель Н1, до точки наблюдения x_R на оси $0x_R$, где расположен ПРМ.

Получив выражение для разности хода с учетом приближенного равенства $\sqrt{1+a} \approx 1+a/2$ при $a \ll 1$ для $x_R \ll R_m$, а также учитывая соотношение для фазового сдвига $\Delta\varphi = 2\pi\Delta r/\lambda$, получим выражение для интерференционного множителя по направлению в плоскости расположения ПРМ (см. рис. 2):

$$\psi(x_R) = \cos \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{x_H^2}{R_H} + \frac{(x_R - x_H)^2}{(R_m - R_H)} \right) \right]. \quad (2)$$

Выражение (2) получено для **точечного** случая, когда поперечные размеры нарушителя $\Delta R_H \approx \lambda$, то есть сравнимы с длиной волны. В реальных РЛТСО $\Delta R_H \gg \lambda$, поэтому для двухпозиционных РЛТСО в структуре принимаемого сигнала появляется минимум, характеризующий область **тени**, когда нарушитель Н2 оказывается на оси ОЗ, то есть при $x_H \rightarrow 0$ (см. рис. 2). Минимум уровня сигнала в области тени объясняется перекрытием Н2 прямой волны и пропаданием интерференции. На рис. 2 представлена лучевая модель формирования геометрической тени в области ПРМ при движении Н2, имеющего размеры Δx_H . Таким образом,

размер геометрической тени будет определяться проекцией размера Δx_H на ось $0x_R$:

$$\Delta x_{R,\min} = \Delta x_H R_m / R_H. \quad (3)$$

Выражение (3) будет справедливо при нахождении Н вблизи ПРМ, то есть при $R_H \approx R_m$. Дифракция ЭМ-волн на Н существенно искажает область тени в плоскости ПРМ. Более точным описанием тени является использование интерференционного множителя $\psi(\Delta\varphi)$ (1).

При получении аналитического выражения для $\psi(\Delta\varphi)$ из (2) необходимо вычесть функцию, описывающую тень при распространении ЭМ-волн через препятствие в виде прямоугольника. Такой функцией служит функция вида $(\sin\alpha)/\alpha$, которая описывает преобразование Фурье от прямоугольной функции, что соответствует дифракции ЭМ-волн на прямоугольном отверстии в дальней зоне, когда используется приближение Фраунгофера [3]. Условие дальней зоны выполняется в области геометрической тени, то есть вблизи оси $0x_R$, когда $R_m \gg \pi\Delta x_H^2 / \lambda$. Для $\lambda = 0,016$ м; $\Delta x_H = 0,3$ м расстояние до плоскости регистрации должно быть больше $R_m \gg 17,67$ м, что соответствует реальным параметрам РЛТСО. Возьмем функцию $(\sin\alpha)/\alpha$ в квадрате, чтобы усилить ее подавляющее действие в области тени (рис. 3,а). В результате для модели с парциальным перекрытием лучей получено аналитическое выражение для интерференционного множителя, учитывающее квадратичное изменение фазы (2) и наличие тени:

$$\psi(\alpha) = \cos(\alpha^2) - 2A_R \left[\frac{\sin(\gamma\alpha)}{\gamma\alpha} \right]^2 + 1, \quad (4)$$

где α , рад – аргумент функции, определяемой в (2); γ – масштабный коэффициент, учитывающий связь аргументов в слагаемых; «1» прибавляется, чтобы сместить интерференционный множитель для учета наличия прямой волны; $A_R = 1$ рад, коэффициент учитывающий размерность.

В работе была определена ширина тени для интерференционного множителя в зависимости от параметров РЛТСО и размеров Н Δx_H , входящих в (2) как разность координат $\Delta x_R = x_{R,2} - x_{R,1}$, определенная по нулевым значениям функции $\cos \alpha^2$ (рис. 3,а), то есть при $\alpha^2 = \frac{\pi}{2}$ из (2) следует:

$$\Delta x_R = 2 \sqrt{\left(\frac{\lambda}{24} - \frac{\Delta x_H^2}{R_H} \right) \cdot (R_m - R_H) + \Delta x_H}. \quad (5)$$

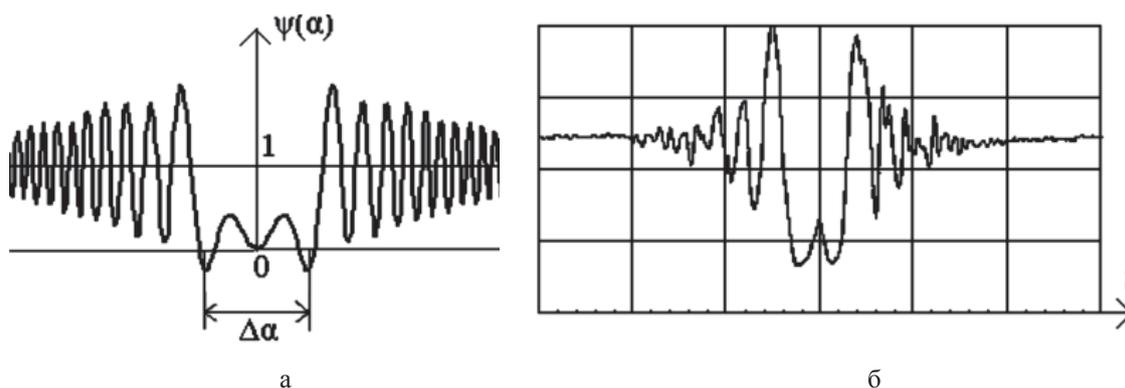


Рис. 3. Формирование интерференционного множителя ЭМ-волны:
а – для теоретической модели; б – сигнал реальной РЛТСО

Откуда следует, что

$$\lim_{R_H \rightarrow R_m} \Delta x_R = \Delta x_H,$$

то есть соответствует геометрической тени. Кроме того,

$$\lim_{\Delta x_H \rightarrow 0} \Delta x_R = \sqrt{2\lambda \cdot (R_m - R_H)},$$

что соответствует точечному объекту на оси Oz на расстоянии R_H от ПРД.

Как уже было отмечено выше, если учитывать движение Н в ОЗ, то можно заменить пространственный анализ ЭМ-волн точечным, то есть использовать **временной анализ АФХ**, который требует одного приемника СВЧ. При этом, если Н будет двигаться со скоростью V_H перпендикулярно оси ОЗ, то, учитывая соотношение $x_H = V_H t$, получим выражение для интерференционного множителя, изменяющегося во времени:

$$\psi(t) = \cos[gt^2] - 2A_R \left[\frac{\sin(gt\sqrt{\pi/2})}{gt\sqrt{\pi/2}} \right]^2 + 1, \quad (6)$$

где A_R , рад – коэффициент, учитывающий размерность;

$$g = \frac{\pi R_m V_H^2}{\lambda R_H (R_m - R_H)},$$

то есть форма изменения интерференционного множителя во времени соответствует форме изменения в пространстве по закону косинуса с **квадратичным** изменением фазы и наличием провала, характеризующего тень от Н.

Заключение

Лучевая модель анализа результата удаленного взаимодействия нарушителя и ЭМ-волн, рассмотренная в данной работе, позволяет оценить форму и параметры принимаемого сигнала, зависящие от интегральных характеристик Н, таких как расстояние и скорость перемещения, но не позволяет получить точное описание комплексной амплитуды ЭМ-волн с целью формирования радиоизображения. Наиболее полное описание такого удаленного взаимодействия Н и ЭМ-волн дает скалярная теория дифракции, основой которой является **интеграл Кирхгофа** [5].

Вид сигналов реальных РЛТСО можно найти, например, в [2]. На рис. 3,б приведен пример сигнала, зарегистрированного в реальной двухпозиционной РЛТСО, полученного при прохождении Н охраняемой зоны. Цена деления по оси времени 3 с для $f = 0,5$ ГГц, при дальности до Н $R_H = 16$ м. Сопоставление графиков реальных сигналов (рис. 3,б) и графиков, полученных для лучевой модели (рис. 3,а), наглядно демонстрирует адекватность приведенных в работе моделей интерференции ЭМ-волн в двухпозиционных РЛТСО.

В данной работе были отмечены возможности измерения параметров Н при регистрации модуля комплексной амплитуды ЭМ-волны по пространственной оси Ox_R за время, когда Н смещается в пространстве на расстояние, равное поперечному размеру: это обнаружение, измерение дальности по ширине тени, измерение скорости движения Н, а также определение количества нарушителей.

Возможно ли измерить эти же параметры при точечном приеме, когда регистрируется модуль комплексной амплитуды ЭМ-волны в точке ПРМ как функция времени? Если не предпринять специальные меры,

то измерить дальность по ширине тени и скорость движения H **невозможно** ввиду следующих обстоятельств: скорость перемещения H влияет на масштаб регистрируемого во времени модуля комплексной амплитуды ЭМ-волны, который будет определять ширину регистрируемой тени; полная интерференционная картина формируется за время пересечения H всей ОЗ, ввиду чего становится невозможным определить траекторию движения H .

Если использовать дополнительные методы обработки регистрируемого модуля комплексной амплитуды ЭМ-волны $|\dot{E}(t)|$, то рассматриваемые параметры измерить возможно, так как информация о них существует и надо только соответствующим образом ее извлечь. Одним из таких дополнительных методов обработки является вейвлет-преобразование [4].

Список литературы

1. Голография. Методы и аппаратура / под ред. В.М. Гинзбург, Б.М. Степанова. – М.: Сов. радио, 1974.

2. Моделирование пространственно-временных сигналов двухпозиционных радиолучевых технических средств обнаружения / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, О.Ф. Павленков, С.А. Степанов // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сб. ст. 7-й Всерос. конф. – Пенза: ПДЗ, 2009. – С. 47–50.

3. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 364 с.

4. Сальников И.И. Приближенная модель вычисления вейвлет-преобразования для идентификации сложных объектов // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – Т.6, – С. 42–44.

5. Юу Ф.Т.С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию. – М.: Сов.радио, 1979. – 304 с.

Рецензенты:

Федотов Н.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой экономической кибернетики Пензенского государственного университета, г. Пенза;

Светлов А.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой радиотехники и радиоэлектронных систем Пензенского государственного университета, г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 22.03.2011.