

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБНАРУЖИТЕЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

К.В. Ланцов, В.В. Ланцов, Л.А. Мартынова (Санкт-Петербург)

Введение. В настоящее время доступность малоразмерных робототехнических комплексов (РТК), прежде всего беспилотных воздушных судов (БВС), привело к широкому их использованию в составе морской роботизированной системы для освещения обстановки [1] или доставки полезной нагрузки (рис. 1). При этом присутствие БВС может угрожать безопасности людей и техники, например, при их катании на прогулочных катерах и яхтах, в ходе которых возможно падение БВС из-за разряда аккумулятора или потери управления [2]. Кроме того, возможен нежелательный пролет БВС над судами рыболовецкой флотилии, средствами военно-морского флота, кораблями дальней комической связи; объектами VIP-персон и т.д.

В связи с этим возникает необходимость выявления фактов несанкционированного использования БВС в акватории и у прибрежных зон.



Рис. 1. Примеры применения малоразмерных БВС [3]

Одним из путей выявления нежелательных БВС является обнаружение сигнала радиомодема, расположенного на борту БВС, в режиме шумопеленгования [4–16]. Особенность обнаружения малоразмерного БВС заключается в малом времени его нахождения в зоне обзора, в особенности в условиях сложного рельефа береговой черты. За короткое время необходимо обнаружить БВС и его идентифицировать. Задача состоит в обнаружении излучаемого БВС сигнала на фоне сторонних сигналов, представляющих собой в данном случае интенсивные помехи по отношению к сигналу БВС.

Для тестирования алгоритмов обнаружения сигнала радиомодема БВС необходимо было создать программно-аппаратный комплекс имитации сигналов, который бы воспроизводил различные варианты интенсивных помех фоновой радиообстановки и позволял оценить возможность обнаружения сигнала БВС на таком фоне. Будем называть сигналы фона, препятствующие обнаружению сигнала радиомодема БВС, интенсивными помехами. Обнаружение сигнала БВС происходит на фоне излучаемых сигналов, и задача состоит в его выделении на фоне многочисленных фоновых сигналов. Частота и параметры сигнала, излучаемого БВС, заранее неизвестны, и в этом случае обнаружение сигнала происходит путем сканирования частотного диапазона и выявления вновь появившейся частоты сигнала

на фоне текущей радиочастотной обстановки. Очевидно, что выявление новой частоты сигнала существенно зависит от «плотности сигналов» фоновой обстановки: при незначительном количестве фоновых сигналов сигнал БВС легче обнаружить, чем в условиях большого количества фоновых сигналов.

Обнаружение БВС на фоне сигналов (помех) происходит путем выделения сигнала по следующим признакам:

- внезапному появлению сигнала на фоне имеющихся сигналов;
- характерным особенностям самого сигнала по частоте, спектру, техническим параметрам;
- характерным особенностям изменения сигнала, вызванным движением БВС.

В связи с этим к имитационному комплексу предъявляются следующие требования:

- формирование интенсивных помех, адекватно отражающих реальную частотно-временную обстановку;
- имитация факта внезапного появления сигнала БВС с определенными техническими параметрами;
- имитация адекватного изменения сигнала БВС в зависимости от взаимного положения БВС относительно положения приемника и направления поворотной антенны.

Имитация необходима для определения параметров сканирования частотных диапазонов с целью минимизации времени обнаружения сигнала радиомодема БВС. Для этого необходимо воспроизведение фоновой обстановки радиочастотных сигналов с различными параметрами. Выполнить это можно только с использованием имитационного моделирования. Поскольку в литературе решение задачи в такой постановке отсутствует, целью явилась разработка имитационной системы формирования интенсивных помех для тестирования алгоритмов обнаружения сигнала БВС на их фоне и определения параметров алгоритмов обнаружения сигнала БВС.

Постановка задачи. Имеется приемник с поворотной антенной: сигнал БВС поступает только в случае, если сектор обзора антенны развернут в сторону БВС. БВС движется равномерно и прямолинейно заранее не известными курсом Q и со скоростью V .

Опишем радиочастотный фон смесью сигналов:

$$S_{\Sigma}(t) = A \cdot S(t) + \sum_{i=1}^n S_{II}(t) + S_{III}(t),$$

где $S(t)$ – искомый сигнал; $A \in \{0,1\}$ – индикатор наличия сигнала; $S_{II}(t)$ – помеховый сигнал; n – число помеховых сигналов; $S_{III}(t)$ – шум.

Каждый n -й помеховый сигнал характеризуется частотой, длительностью, периодом появления, амплитудой, сигнальным «созвездием», частотным спектром, видом модуляции и манипуляции, символьной скоростью. Под манипуляцией понимают способ модуляции, при котором параметры несущего колебания меняются скачкообразно. Например, при частотной манипуляции сигнала каждому возможному значению передаваемого символа сопоставляется своя частота. В течение каждого символьного интервала передается гармоническое колебание с частотой, соответствующей текущему символу. Понятие «символьная скорость» применяется в передаче цифрового сигнала в виде последовательности целых чисел, которые могут принимать значения из некоторого фиксированного конечного множества. Эти числа, называемые символами, поступают от источника информации с некоторой частотой, называемой символьной скоростью [17].

Заданы дальность обнаружения и угловая скорость вращения антенны.

Рассматривается следующий тактический эпизод: в процессе движения БВС попадает в сектор обзора поворотной антенны приемника, и в этот момент приемник регистрирует внезапно появившийся новый сигнал.

Необходимо сформировать имитационную систему для тестирования алгоритмов обнаружения сигнала БВС.

Для тестирования алгоритмов обнаружения сигнала БВС потребовалась разработка следующих имитаторов:

- имитатор сигналов общего радиочастотного фона с постоянно излучаемыми сигналами и периодически излучаемыми сигналами; период и продолжительность таких сигналов заранее не известна;

- имитатор движения БВС относительно приемника и имитация вращения поворотной антенны для определения момента попадания БВС в пределы сектора обзора поворотной антенны: в этот момент считаем, что приемник обнаружил новый сигнал радиомодема БВС;

- имитатор возникновения в приемнике внезапно появившегося сигнала БВС произвольной (случайной) частоты с заранее не известными техническими параметрами сигнала;

- имитатор изменения пеленга БВС и уровня сигнала БВС по мере движения БВС.

Имитатор движения БВС относительно приемника. В имитаторе тактической обстановки (ИТО) задаются (рис. 2):

- координаты расположения приемника (x_a, y_a, z_a) в 3D-пространстве;

- параметры антенны: угловая скорость вращения ω , раствор сектора обзора α ;

- начальные координаты БВС (x_b, y_b, z_b) , его курс Q и скорость V : $Q=\text{const}, V=\text{const}$;

- текущий угол поворота антенны.

При имитации движение БВС предполагается равномерным прямолинейным, поэтому изменение его координат:

$$x_{n+1} - x_n = V \sin Q,$$

$$y_{n+1} - y_n = V \cos Q,$$

где n – текущий момент времени, которое при имитации принимается дискретным.

Имитация вращения поворотной антенны: $\alpha_{n+1} - \alpha_n = \omega t_{n+1}$.

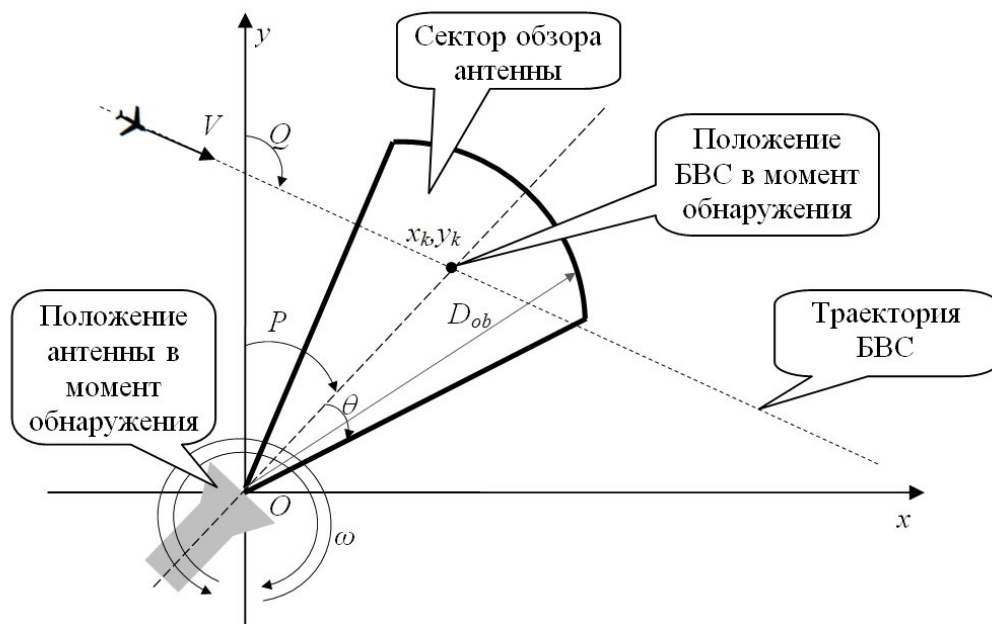


Рис. 2. Схема взаимного положения БВС и поворотной антенны

В работе рассмотрено использование узконаправленной стационарной поворотной антенны с круговым вращением. Предполагается, что обнаружение БВС осуществляется амплитудным методом по максимуму уровня сигнала при направлении на источник. Имитируется изменение положения характеристики направленности (ХН) антенны. Воспроизводилось круговое вращение антенны с заданной угловой скоростью. В момент попадания БВС в сектор обзора антенны формировалось возникновение сигнала БВС.

Реализовано изменение уровня сигналов БВС с учетом взаимного положения БВС относительно антенны приемника.

Имитатор частотно-временного радиосигнального фона. При имитации интенсивных помех радиочастотного фона формируемые сигналы фона характеризовались следующими параметрами:

- моментом их появления (периодичность/разовость появления сигнала);
- характером сигнала (непрерывный/импульсный; если импульсный – то длительность и периодичность импульса);
- техническими параметрами.

Для имитации фоновых сигналов интенсивных помех с определенными техническими параметрами заранее была сформирована база данных сигналов, отличающихся техническими параметрами.

В имитаторе радиочастотного фона задаются сигналы постоянные и периодически возникающие в случайные моменты времени, задаются их частоты, периодичность возникновения и продолжительность излучения, технические параметры (частотный спектр, вид модуляции/манипуляции, сигнальное «созвездие», символьная скорость). Для придания случайности момент появления и продолжительность сигналов разыгрываются. Параметры сигналов разыгрываются только из возможных типовых сигналов. В имитаторе сигнала БВС задаются частоты, используемые БВС: от маленьких игрушечных моделей до крупногабаритных БВС. Кроме того, задаются значения классификационных признаков, по которым происходит идентификация сигнала БВС: гистограмма амплитуды сигнала, «созвездие», частотный спектр, частотно-временная развертка, символьная скорость.

Для имитации сигналов интенсивных помех во временной области сформировано два разных массива:

- $S_k(t)$ постоянно присутствующих сигналов;
- $S_m(t)$ периодически появляющихся сигналов, наблюдаемых в течение ограниченного периода времени и моменты появления которых – случайны («временные» сигналы).

Для формирования указанных массивов заранее были случайным образом сформированы постоянно присутствующие сигналы.

Для формирования массива периодически появляющихся сигналов в каждом такте имитации разыгрывалось случайное число, по которому назначалась новая частота. Кроме того, по каждому уже имеющемуся «временному» сигналу разыгрывалось случайное число для определения, продолжается ли излучение данным сигналом или прекращается. В зависимости от этого элемент массива либо исключался из массива, либо продолжал в нем оставаться. При этом вновь появившийся сигнал мог появляться ранее, что характеризует такой сигнал как периодический.

По каждому текущему сигналу также разыгрывались случайно его уровень и частота.

В результате формирования сигнального фона в каждом такте имитации создавались следующие множества сигналов:

- множество N_s ранее обнаруженных сигналов $\{S_i\}, i=1, \dots, N$;
- множество M_s постоянно наблюдаемых сигналов $\{S_j\}, j=1, \dots, M$;
- множество K_s периодически наблюдаемых сигналов $\{S_k\}, k=1, \dots, K$;
- множество L_s вновь появившихся сигналов $\{S_l\}, l=1, \dots, L$,

при этом: $N=M+K$; $N_s = M_s \cup K_s$.

Имитационная система позволяет регулировать процентное содержание появления постоянных сигналов и периодически появляющихся сигналов.

Имитатор сигналов с определенными техническими параметрами. Имитацию фона сформируем из сигналов, которые доставляют наибольшие проблемы при выявлении сигнала БВС – это связные и телевизионные сигналы.

На рис. 3 приведены виды спектров имитируемых телевизионного и связных сигналов.

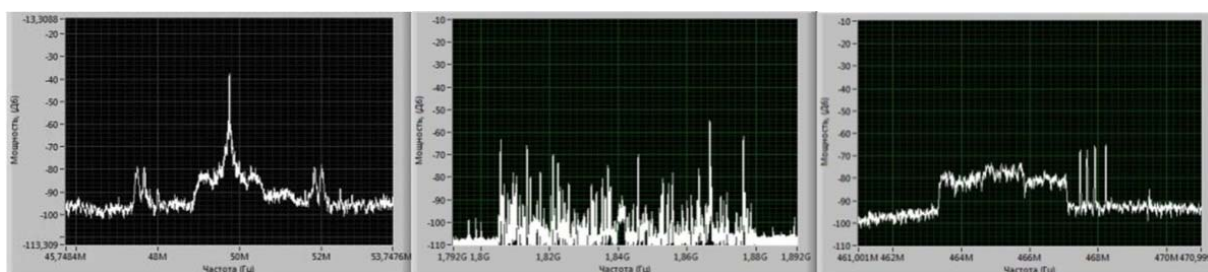


Рис. 3. Вид спектров имитируемых сигналов: телевизионного сигнала(слева), сигнала базовых станций мобильной связи (в центре), сигнала 3G (справа)

На рис. 4 показаны результаты имитации произвольных сигналов с различными частотными спектрами:

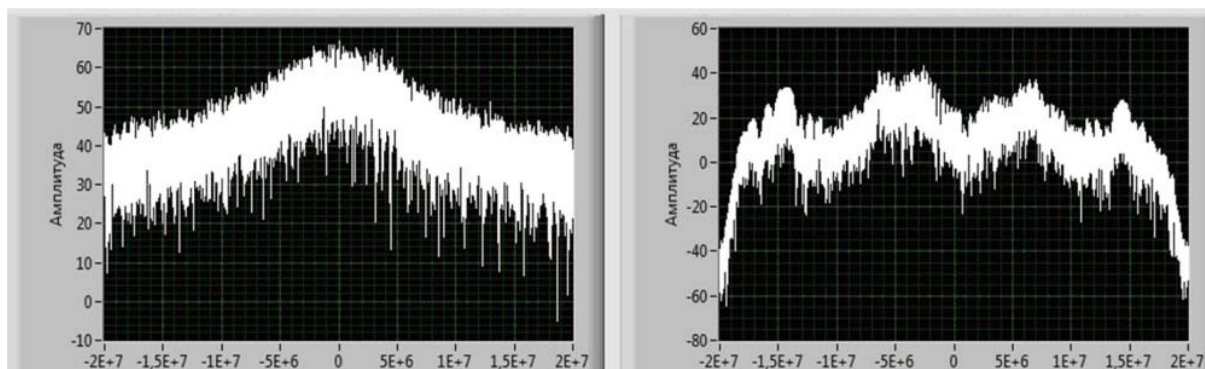


Рис. 4. Вид имитационных произвольных сигналов с различными частотными спектрами

Имитация сигналов с различными типовыми траекториями движения вектора, определяемого координатами синфазной и квадратурной составляющих («созвездий») сигнала: BPSK, QPSK, QAM, FM, AM, PM. с разной степенью зашумления, приведены на рис. 5.

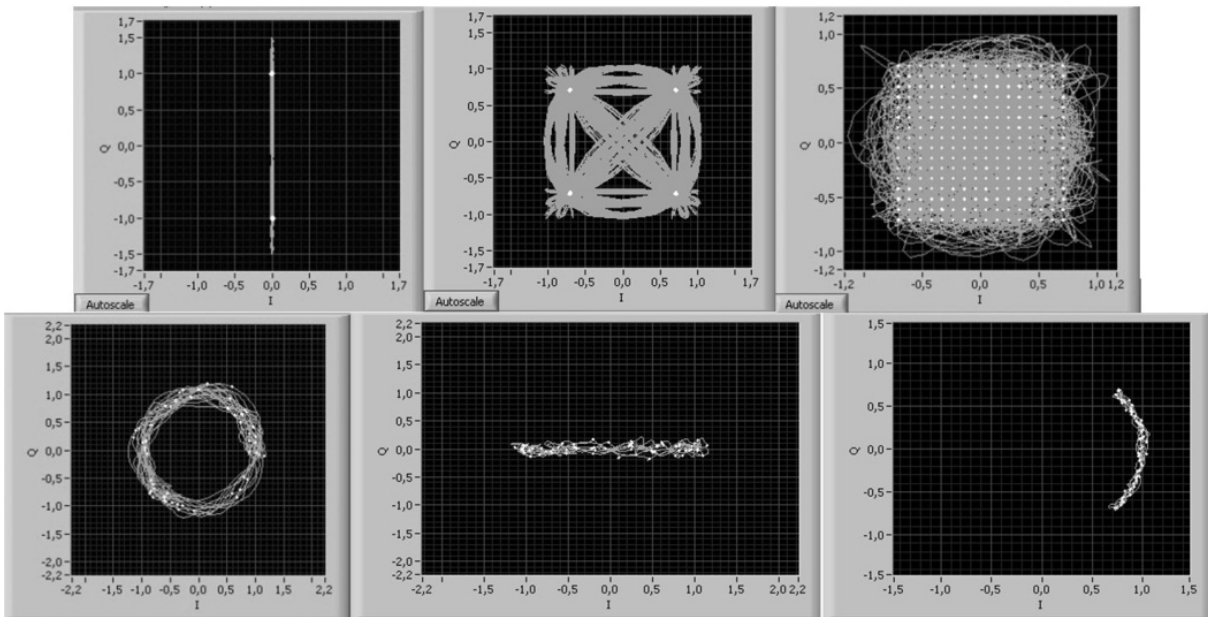


Рис. 5. Виды типовых созвездий BPSK, QPSK, QAM, FM, AM, PM имитируемых сигналов

На рис. 6 приведены имитируемые сигналы с различными видами модуляции.

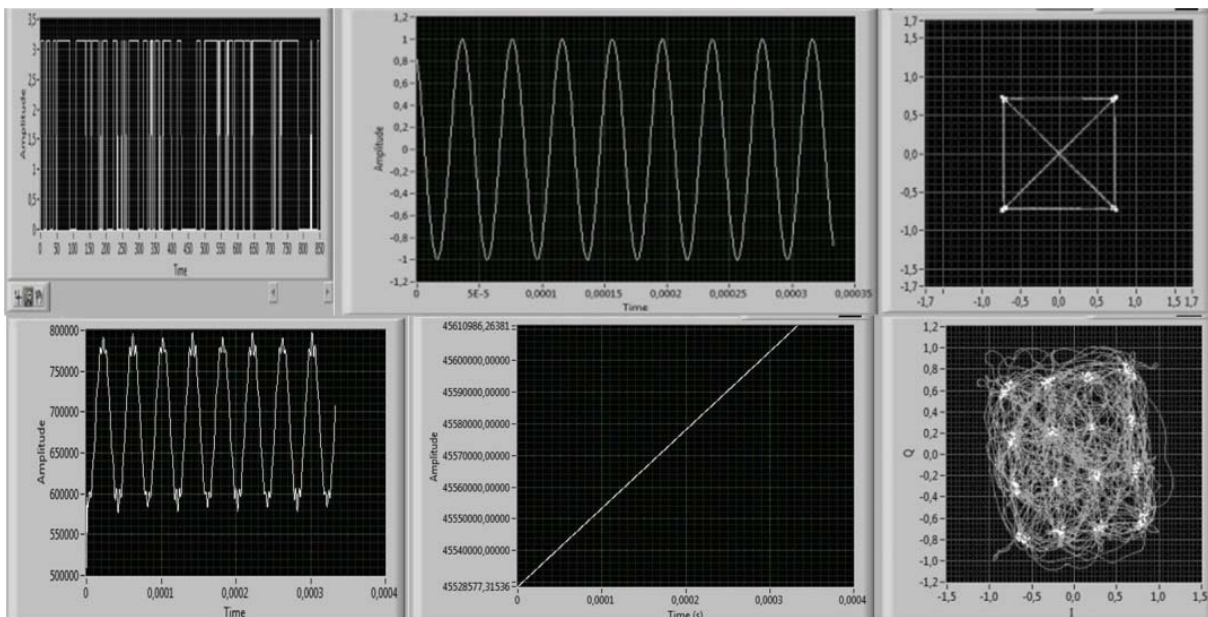


Рис.6. Вид имитируемых сигналов с различными видами модуляции:
 частотная манипуляция (верхний ряд, слева),
 амплитудной модуляции (верхний ряд, в центре),
 фазовая манипуляция (верхний ряд, справа),
 частотной модуляции (нижний ряд, слева),
 фазовой модуляции (нижний ряд, в центре),
 квадратурно-амплитудная манипуляция (QAM) (нижний ряд, справа)

Для имитации возникновения сигнала с определенными техническими параметрами предварительно всем возможным техническим параметрам сигнала присваиваются порядковые номера j из диапазона от 1 до P_i , где P_i – количество возможных вариантов технических параметров i -го сигнала в момент времени t_k .

Имитатор внезапного появления сигнала БВС. Определение момента появления сигнала БВС происходит по следующему алгоритму:

Шаг 1. Запускаем процесс имитации заданной длительности; продолжительность каждого такта в данном случае значения не имеет.

Шаг 2. В ходе имитации в каждом k -м такте разыгрывается равновероятно случайное число ξ_1 из диапазона $[0;1]$, которое получается с использованием стандартного генератора случайных чисел.

Шаг 3. Производится сравнение случайного числа ξ_1 с заданным порогом P_i^* .

Если случайное число ξ_1 оказалось меньше вероятности появления сигнала БВС P_i^* , то есть выполняется условие:

$$\xi_1 < P_i^*,$$

то принимается, что в текущий момент времени t_k произошло появление сигнала, и осуществляется переход к шагу 4, в противном случае считается, что появления сигнала БВС не произошло.

Шаг 4. Определение частоты n_i обнаруженного сигнала.

Иницируется датчик случайных чисел, и по равновероятному закону разыгрывается случайное целое число ξ_2 из частотного диапазона $f_1 \div f_2$. Переход к шагу 5.

Шаг 5. В цикле по i от f_1 до f_2 анализируется выполнение равенства:

$$i = \xi_2.$$

При выполнении равенства принимается, что частота обнаруженного сигнала f_i в момент времени t_k , и осуществляется переход к шагу 6.

Шаг 6. Алгоритм определения параметров обнаруженного сигнала j на частоте f_i . Иницируется датчик случайных чисел, и по равновероятному закону разыгрывается случайное число ξ из диапазона $[1, J_i]$. Осуществляется переход к шагу 7.

Шаг 7. В цикле по J_i анализируется выполнение равенства:

$$j = \xi.$$

При выполнении равенства принимается, что обнаруженный сигнал имеет технические параметры на частоте f_i в момент времени t_k .

Имитация изменения сигнала по мере движения БВС. После имитации внезапного появления сигнала БВС с определенными техническими параметрами необходимо имитировать адекватное изменение параметров сигнала по мере изменения взаимного положения БВС и антенны приемника.

Период времени наблюдения за изменением параметров сигнала БВС определяется временем пребывания БВС в секторе обзора поворотной антенны.

Имитировались изменения следующих параметров сигнала БВС:

- имитация частотного спектра и частотно-временной развертки;
- имитация нарастания или снижения мощности;
- имитация изменения пеленга.

На рис. 7 приведены результаты имитации изменения телевизионного сигнала с течением времени: спектр сигнала представлен на рис.7 слева, частотно-временная развертка представлена на рис.7 справа.

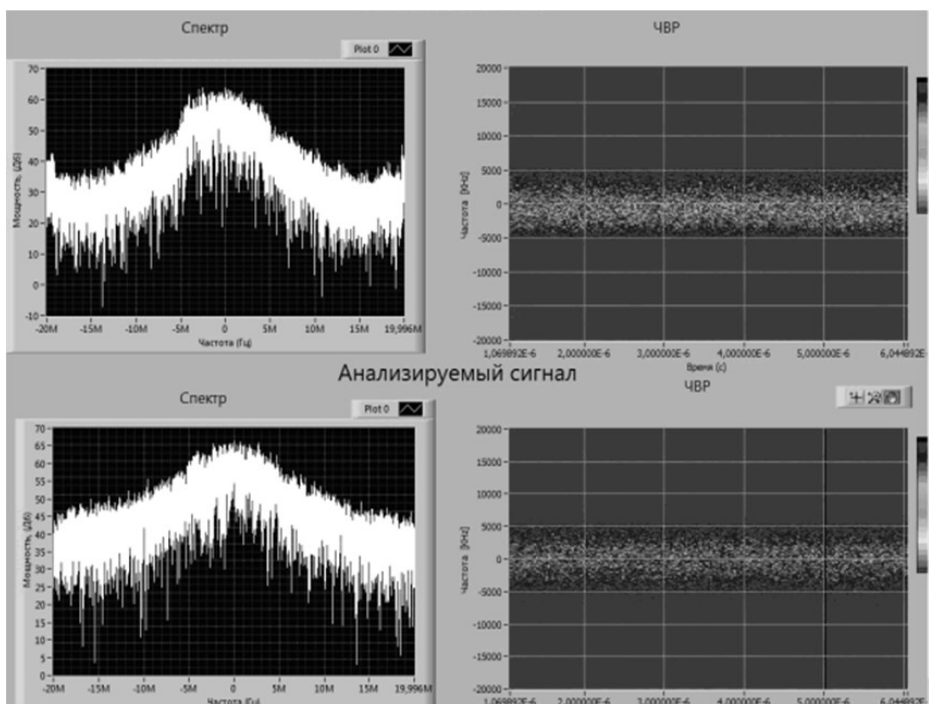


Рис. 7. Формирование частотного спектра и частотно-временной развертки

Для имитации изменения мощности потребовалось оценить положение БВС относительно сектора обзора поворотной антенны.

Имитация возникновения максимума сигнала и формирования пеленга БВС в зависимости от раствора сектора обзора определяется пересечением оси характеристики направленности (ХН) с траекторией движения БВС. Уравнение прямой, соответствующей оси ХН антенны, имеет вид $y_a = A_a \cdot x_a + B_a$, где $A_a = \operatorname{tg} \alpha$, $B_a = 0$.

Пеленг в момент обнаружения БВС определяется выражением:

$$P_n = \operatorname{arctg} \left(\frac{X_n - X_{n-1}}{Y_n - Y_{n-1}} \right).$$

При повороте антенны происходит изменение мощности сигнала с течением времени. Оценка изменения мощности происходила путем расчета энергетического показателя сигнала на фиксированном временном интервале в скользящем окне. Для этого оценивалось расстояние от БВС до антенны и, кроме того, оценивалось направление сектора обзора антенны, для этого имитируется ее характеристика направленности ХН в виде массива точек. При моделировании определения уровня ХН использовалась кубическая сплайн-интерполяция.

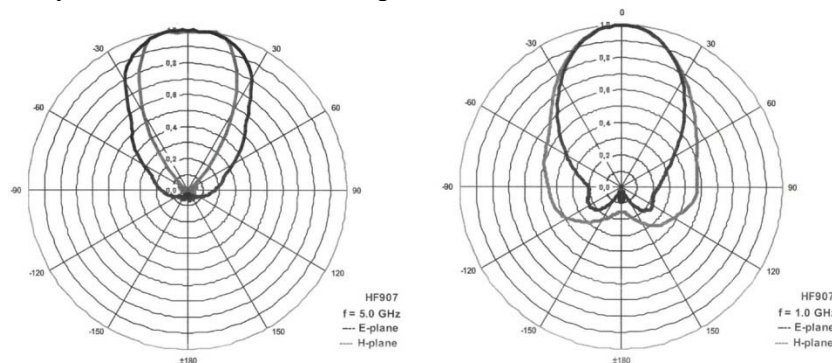


Рис. 8. Характеристики направленности поворотной рупорной антенны R&S [18]

Из приведенных выражений определяется точка пересечения двух линий: маршрута движения БВС с ХН поворотной антенны. Для определения уровня ХН определяем положение БВС относительно оси ХН.

С изменением расстояния до БВС и положения относительно ХН поворотной антенны имитируется изменение мощности. На рис. 9 показано увеличение мощности по мере приближения БВС к приемнику и снижение мощности по мере удаления БВС от приемника.

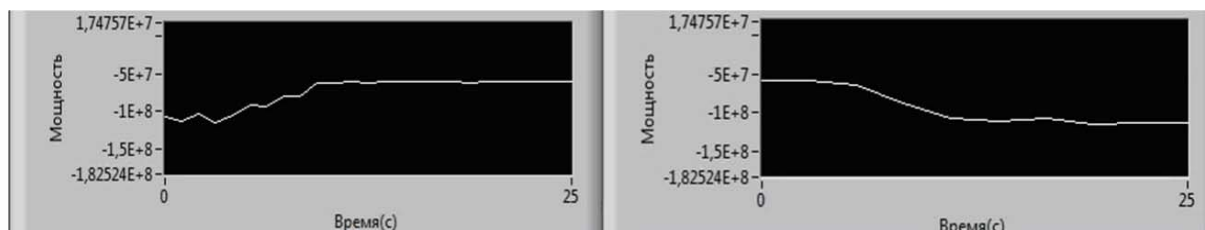


Рис. 9. Увеличение мощности (слева) и уменьшение мощности (справа)

Таким образом, разработана имитационная система формирования интенсивных помех для тестирования алгоритмов обнаружения сигнала радиомодема беспилотного воздушного судна. В имитационной системе воспроизводятся: фоновая радиочастотная обстановка путем имитации интенсивных помех в виде сигналов с различной периодичностью их появления и различными их техническими параметрами; движение БВС, вращение поворотной антенны приемника, анализ попадания БВС в сектор обзора поворотной антенны, зависящего от положения БВС в секторе обзора. Имитационная система разработана в среде LabVIEW.

Проверка адекватности имитационно модели. Адекватность имитационной модели проверялась в реальных условиях при проведении натурального эксперимента. В ходе эксперимента запускалось сторонней организацией заранее не известное малоразмерное БВС с заранее не известными сигналами радиомодема, находящегося на его борту.

В ходе проведения эксперимента алгоритмы обнаружения сигнала БВС на фоне интенсивных помех, протестированные с использованием разработанной имитационной модели, позволили:

- обнаружить сигнал неизвестного БВС;
- определить параметры обнаруженного сигнала и благодаря этому –
- выявить факт присутствия БВС и перехватить видеосигнал его радиомодема;
- декодировать видеосигнал и наблюдать на мониторе комплекса обнаружения сигнала БВС – видеоизображение, передаваемое обнаруженным сигналом с БВС.

Никаких предварительных данных о наличии видеосигнала и его параметрах не было.

Заключение

Разработанная имитационная система формирования интенсивных помех позволила протестировать алгоритмы обнаружения сигнала БВС. Адекватная имитация реальных сигналов дала возможность отработать алгоритмы обнаружения сигналов БВС, что позволило в натуральных условиях реальной обстановки обнаружить «новый», заранее неизвестный сигнал на определенной частоте. Технический анализ позволил идентифицировать сигнал как телевизионный, и на обнаруженной частоте был перехвачен видеосигнал. По перехваченному видеосигналу в режиме реального времени удалось вывести изображение на пульте оператора в реальном масштабе времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 23-29-00803.

Литература

1. **Martynova L.A., Koryakin A.V., Lantsov K.V., Lantsov V.V.** Determination of coordinates and parameters of a moving object by image processing // *Computer Optics*. 2012. Т. 36. № 2. С. 266-273.
2. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 109–121.
3. БВС пролетел над морем. URL: https://www.google.com/search?q=%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90+%D0%BD%D0%B0%D0%B4+%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B9&tbm=isch&ved=2ahUKEwiWxpOT3tb-AhXQuioKHeBGDu4Q2-cCegQIABAA&oq=%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90+%D0%BD%D0%B0%D0%B4+%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B9&gs_lcp=CgNpbWcQAzoHCAAQGBCABFDUCVjsNWD9N2gAcAB4AIABYIgbjQSSAQIxMJgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&scient=img&ei=eQ9RZNalM9D1qgHgjbndg&bih=819&biw=1018&rlz=1C1GCEU_ruRU995RU995#imgrc=PzbOyKOFJ990pM (дата обращения 02.05.2023).
4. **Афонин И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В., Привалов А.А.** Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитных ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, Ливии и Нагорном Карабахе // *Системы управления, связи и безопасности*. 2020. № 4. С. 163–191.
5. **Шпигарь Н., Олейник А., Спичак Е.** Обнаружение и подавление БПЛА // *Арсенал Отечества*. 2021. № 1 (51). С. 18–23.
6. **Макаренко С.И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.
7. **Макаренко С.И., Тимошенко А.В.** Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 2. Огневое поражение и физический перехват // *Системы управления, связи и безопасности*. 2020. № 1. С. 147–197.
8. **Ростопчин В.В.** Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // *Беспилотная авиация*. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye летательные_аппараты_и_противовоздушная_оборона_-проблемы_и_перспективы_противостояния (дата обращения 20.01.2022).
9. **Скиба В.А., Кузьмин А.А.** Анализ методов и средств противодействия беспилотным летательным аппаратам в интересах Ракетных войск стратегического назначения // *Военная мысль*. 2021. № 11. С. 104–114.
10. **Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И.** Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // *Арсенал Отечества*. 2014. № 6 (14). URL: <http://arsenalotechstva.ru/new/389-antidrone> (дата доступа 20.01.2022).
11. **Тимохин А.** Решение проблемы «насыщающих» атак ПВО // *Военное обозрение*. 2019. URL: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyschajuschih-atak-pvo-onoest-i-nadnim-rabotajut.html> (дата доступа 20.01.2022).
12. **Веремеенко С.** Обнуление цифровой электроники // *Арсенал Отечества*. 2021. № 1 (51). С. 38–40.
13. **Лопаткин Д.В., Савченко А.Ю., Солоха Н.Г.** К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // *Военная мысль*. 2014. № 2. С. 41–47.

14. Российские противовертолетные мины и зарубежная реакция // Военное обозрение. URL: <https://topwar.ru/188195-rossijskie-protivovertoletnie-miny-i-zarubezhnaja-reakcija.html> (дата доступа 20.01.2022).
15. **Колибернов Е.С., Корнев В.И., Сосков А.А.** Справочник офицера инженерных войск / под ред. С.Х. Аганова. М.: Воениздат, 1989. 432 с.
16. **Митрофанов Д.Г., Шишков С.В.** Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28–40.
17. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. / Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2003. 608 с.
18. Рупорная антенна R&S HF907 0.8 – 18 ГГц. URL <https://ferria.ru/product/hf907/> (дата обращения 02.05.2023).