

УДК 004.942

ИМИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО БВС В ЦЕЛЯХ БЕЗОПАСНОСТИ АНПА

Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. (Санкт-Петербург)

Введение

В настоящее время ведущие морские державы разрабатывают большие автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) и их системы управления [1] для решения широкого круга задач как при их одиночном использовании, так и в составе группы [2]. При решении задач обеспечения безопасности большого АНПА [3] и других объектов морской инфраструктуры, необходим контроль за несанкционированным полетом в воздухе авиалайнеров, самолетов, вертолетов и беспилотных воздушных судов (БВС). Особую опасность для морских объектов представляют малоразмерные БВС из-за возможного проведения фото- и видеосъемки [4-11] или доставки полезной нагрузки. При обнаружении малоразмерных БВС необходимо определение их местоположения, например, по разностно-дальномерному методу [12] в режиме шумопеленгования по сигналу, излучаемому с борта БВС. Излучаемый сигнал может содержать информацию о телеметрии или видеоизображении. При этом определение местоположение БВС должно осуществляться с погрешностью не выше заданной, для чего в силу ограниченности возможностей приемной аппаратуры необходимо использование дополнительных алгоритмов обработки передаваемого с борта БВС сигнала. Как правило, с борта БВС передаются сигналы цифрового телевидения или сигналы цифровой модемной связи, представляющие собой сверхширокополосные сигналы [13, 14].

Для обнаружения малоразмерного БВС система обнаружения включает в свой состав, как минимум, четыре пространственно-распределенных приемника (ПРП) радио- и телевизионных сигналов, излучаемых БВС, и пункт обработки сигналов для определения местоположения БВС.

Схема пространственно-распределенного программно-аппаратного комплекса определения местоположения БВС приведена на рисунке 1.

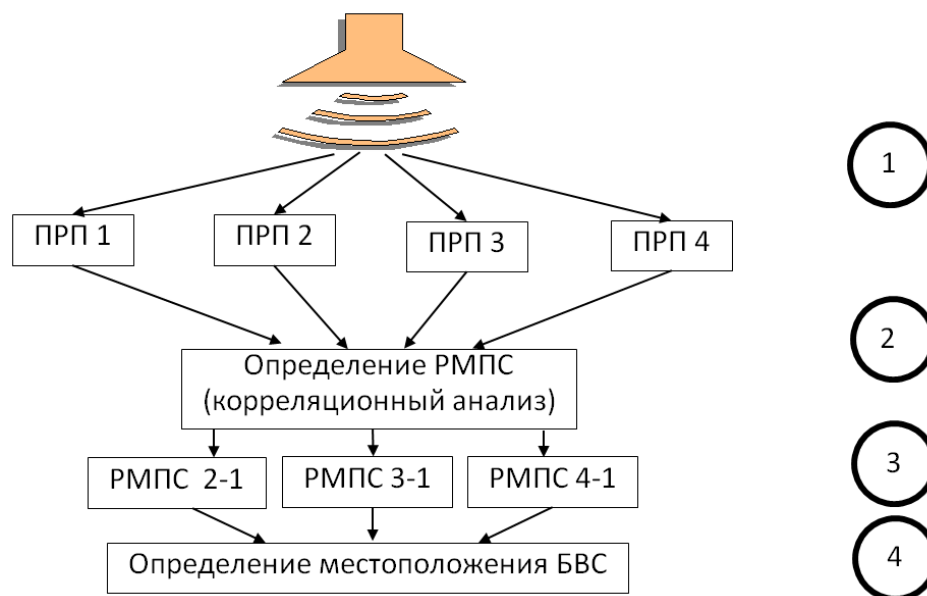


Рис. 1. Схема пространственно-распределенного программно-аппаратного комплекса

На рисунке 1 цифрами справа обозначены этапы обработки информации для определения местоположения БВС.

1) Регистрация сигнала и записи его в бинарный файл. Особенность синхронизации процесса записи принятых сигналов в файл на персональных компьютерах (ПК), к которым подключены ПРП, заключается в отсутствии связи ПК между собой, что затрудняет синхронизацию их друг с другом с требуемой погрешностью. Запись сигнала в файл происходит с шагом дискретизации, который определяется условием возможности последующей передачи файла на пункт определения местоположения БВС в реальном масштабе времени.

2) Передача файла с ПРП на пункт обработки сигналов для определения местоположения БВС. Передача файлов между ПК на пункте приема и ПК на пункте определения местоположения БВС организована по локальной сети, сформированной на базе Интернета с помощью сотовой связи. Наиболее непредсказуемым по времени является передача файла по сотовой связи из-за возможных задержек базовой станции, что приводит к необходимости минимизации всех остальных «предсказуемых» процессов по обработке сигналов и минимизации объема передаваемой информации за счет ограничения количества передаваемых отсчетов зарегистрированных сигналов.

3) Определение разностей дальностей от приемников до источников методом измерения разности моментов прихода сигналов (РМПС) на основе нахождения максимума взаимной корреляционной функции двух сигналов [15,16]. Поскольку аппаратные средства – малогабаритные, быстроразвертываемые, мобильные, скрытные с ограниченными возможностями и не позволяют достигнуть требуемой погрешности определения местоположения БВС, то для уменьшения погрешности при обработке сигналов используют интерполяцию сигналов кубическими сплайнами.

4) Определение координат положения малоразмерного БВС разностно-дальномерным методом [12]. Погрешность определения местоположения БВС пропорциональна погрешности оценки РМПС. В связи с этим для уменьшения погрешности определения РМПС использована интерполяция сигнала кубическим сплайном.

Из-за особенностей сверхширокополосного сигнала и дополнительным использованием интерполяции кубическим сплайном при его обработке для определения местоположения БВС возникла задача определения зоны, в пределах которой обеспечивается определение местоположения БВС, и оценки степени уменьшения погрешности определения местоположения малоразмерного БВС в зависимости от различных условий, отличающихся положением БВС, направлением его движения и частотой сигнала.

Имеющиеся публикации [17-20], в основном, посвящены особенностям применения малоразмерных БВС и способам борьбы с ними – без раскрытия деталей технической реализации этих способов и успешности их применения.

В связи с этим **целью работы** явилась разработка имитационной системы обработки сверхширокополосных сигналов для определения местоположения малоразмерного БВС и для оценки степени уменьшения погрешности определения местоположения малоразмерного БВС в зависимости от различных условий, отличающихся положением БВС, направлением его движения БВС и частотой сигнала.

1. Постановка задачи

Пусть в глобальной системе координат Ox известны:

– координаты положения пространственно-распределенных приемников, которые при обнаружении сигнала БВС регистрируют его и передают в пункт приема и обработки сигналов для определения местоположения. По полученным

сверхширокополосным сигналам осуществляется их обработка и оценка разности прихода сигналов с использованием интерполяции кубическим сплайном.

Пусть в некоторый случайный момент времени обнаружен БВС, движущийся курсом Q_b и скоростью V_b .

Необходимо сформировать имитационную систему для определения:

- зоны, в пределах которых обеспечивается определение местоположения БВС;
- степени уменьшения погрешности определения местоположения БВС от использования интерполяции кубическим сплайном при установлении разности прихода широкоимпульсных сигналов, излучаемых с борта БВС.

Для достижения цели в работе сформирована имитационная система, обеспечивающая:

- моделирование появления и движения малоразмерного БВС;
- формирование широкополосного сигнала, передаваемого с борта малоразмерного БВС;
- оценку затухания широкополосного сигнала;
- реализацию интерполяции кубическим сплайном широкополосного сигнала для уточнения разности прихода двух широкополосных сигналов на пункты приема;
- решение навигационной задачи для определения местоположения малоразмерного БВС разностно-дальномерным методом;
- определение зоны, в которой обеспечивается обнаружение БВС;
- оценку степени уменьшения погрешности определения местоположения малоразмерного БВС за счет применения интерполяции кубическим сплайном широкополосных время-импульсных сигналов при расчете разности их прихода.

2. Имитационная система

Имитационная система включает в свой состав:

- имитатор тактической обстановки (ИТО);
- модель движения БВС;
- модель широкополосного сигнала, излучаемого с борта БВС;
- модель затухания широкополосного сигнала;
- интерполяция кубическим сплайном моделируемого широкополосного сигнала;
- решение навигационной задачи.

Имитатор тактической обстановки

В имитаторе тактической обстановки (ИТО) задаются:

- начальные координаты БВС (x_b, y_b) , его курс Q и скорость V : $Q = \text{const}$, $V = \text{const}$;
- координаты положения приемников (x_{ak}, y_{ak}) , $k=1, \dots, 4$.

Модель движения БВС

Изменение координат БВС при имитации опишем разностными уравнениями в предположении равномерного прямолинейного его движения:

$$\begin{aligned}x_{n+1} - x_n &= V \sin Q, \\y_{n+1} - y_n &= V \cos Q,\end{aligned}$$

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

Модель широкополосного сигнала, излучаемого с борта БВС

В качестве модели широкополосного сигнала цифрового телевидения используем моноцикл Гаусса, описываемый первой производной от функции распределения Гаусса и зависящий от амплитуды импульса и затухания [13, 14].

$$S(t) = A \frac{\sqrt{2e}}{\tau} e^{-(t/\tau)^2}$$

где A – амплитуда импульса, τ – временная константа, характеризующая затухание (длительность импульса – $2\pi\tau$).

При моделировании воспроизводится кодирование информации посредством временной позиционно-импульсной модуляции. Один информационный бит кодируется последовательностью импульсов. Время смещения не превышает четверти длительности импульса. Для разделения каналов передачи исходное положение каждого импульса сдвигают на время, пропорциональное текущему значению некоторой псевдослучайной последовательности (ПСП). При этом время сдвига на один-два порядка выше, чем смещение при временной модуляции.

На рисунке 2 приведен результат моделирования импульса широкополосного сигнала.

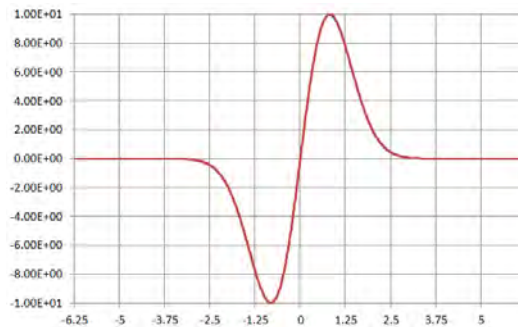


Рис.2. Результат моделирования импульса широкополосного сигнала

Модель затухания широкополосного сигнала

Для оценки потерь широкополосного сигнала при распространении использована эмпирическая модель Уолфиша-Икегами [21].

Согласно модели Уолфиша-Икегами медианное значение затухания L_b определяется по эмпирической формуле, как сумма потерь распространения волн в свободном пространстве, потерь за счет отражений от зданий и потерь за счет дифракции:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ L_0, & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases}$$

где: L_0 – потери распространения волн в свободном пространстве, дБ.

L_{rts} – потери за счет отражений от зданий;

L_{ori} – потери, обусловленные ориентацией улиц относительно направления прихода сигнала,

L_{msd} – потери за счет дифракции.

Интерполяция кубическим сплайном моделируемого широкополосного сигнала

При аппроксимации принятых приемниками сигналов $s_1(t_i)$ и $s_2(t_i)$ кубическими сплайнами в каждом моделируемом сигнале выделяем максимум, фиксируем отсчеты I_1, I_2 его положения и формируем сигналы $F_1(t_i)$ и $F_2(t_i)$ в окрестности выделенной локального максимума длительностью M отсчетов. На рис. 3а) и 3б) показан выбор максимума $s_1(t_i)$ (рис. 3а) и $s_2(t_i)$ (рис. 3б) и результат формирования фрагментов указанных сигналов в пределах $M=3$ отсчета длительностью Δt_F (оттенены серым цветом).

Совмещаем сигналы $F_1(t_i), F_2(t_i)$ так, чтобы отсчеты, в которых находятся их максимумы, совпали. Пример для $F_1(t_i)$ и $F_2(t_i)$ приведен на рис. 3в). На рисунке 3в)

показаны исходные положения сплайнов сигналов $s_1(t_i)$ и $s_2(t_i)$, и результат совмещения максимумов $F_1(t_i)$ и $F_2(t_i)$ в одном отсчете.

Находим коэффициенты сплайнов из условий непрерывности первых и вторых производных в узлах интерполяции. В качестве граничных условий используем $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$. На рис. 3а) и 3б) приведены результаты интерполяции сигналов $F_1(t_i)$ и $F_2(t_i)$ кубическим сплайном. Нормируем $F_1(t_i)$, $F_2(t_i)$ и увеличиваем частоту дискретизации на участке в L раз: между имеющимися отсчетами длительностью Δt_F вводим промежуточные отсчеты, которые в L (на рис.3 $L=10$) раз меньше прежних (на рис. 3в – светлые вертикальные линии). По найденным функциям кубического сплайна $S_1(x)$, $S_2(x)$ восстанавливаем сигналы $F_1(t_i)$, $F_2(t_i)$ в промежуточных отсчетах.

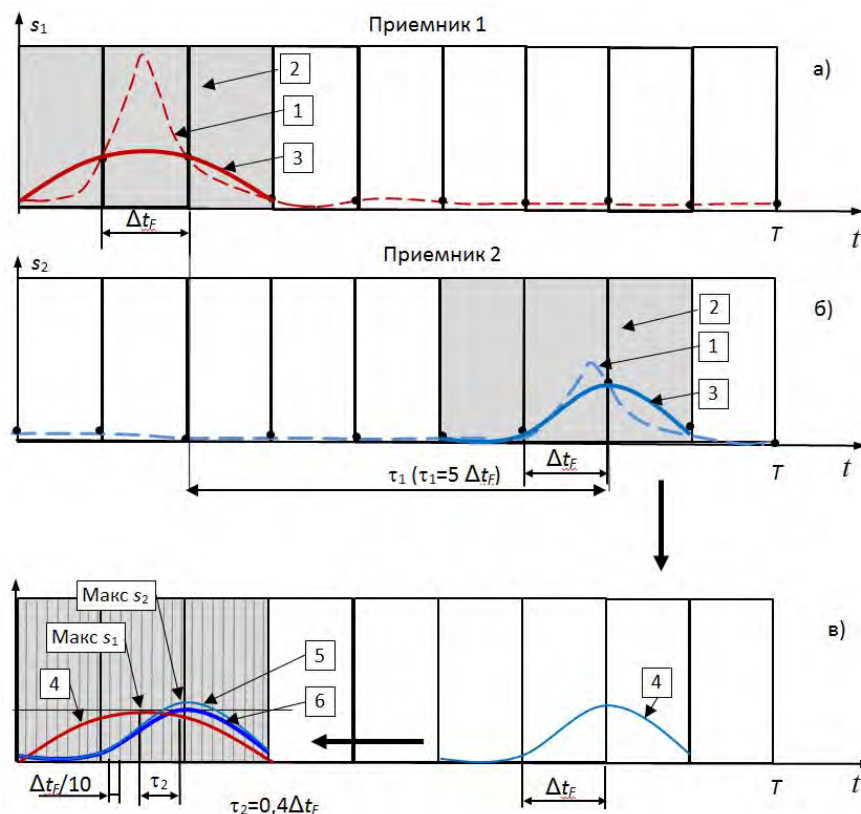


Рис. 3. Результаты моделирования с использованием разработанного метода.

Обозначения на рисунке: 1 – моделируемый сигнал, 2 – выделенная область в окрестности максимума сигнала, 3 – сплайн-интерполяция моделируемого сигнала, 4 – перемещение сплайн-интерполяции сигнала $s_2(t_i)$ на шкалу сигнала $s_1(t_i)$, 5 – совмещение выделенной области сигнала s_2 с выделенной областью сигнала $s_1(t_i)$, 6 – нормирование сплайн-интерполяции сигнала $s_2(t_i)$

Из-за возникающих изломов у функции при построении кубического сплайна в рассматриваемых сигналах возникают осцилляционные структуры, имеющие ярко выраженный экстремум, по разности между которыми и определяем РМПС в долях первоначального отсчета.

Получив РМПС в долях отсчета Δt_F , определяем окончательное значение РМПС. Так, в рассматриваемом примере на рисунке 3 в локальной области получено значение РМПС $0,4\Delta t_F$. Для определения уточненной поправки просуммируем значения первоначально полученной РМПС $5\Delta t_F$ и полученной в окрестности локальной особенности сигнала РМПС, в результате чего получаем новое значение РМПС, равное $5,4\Delta t_F$.

Решение навигационной задачи

Определение координат (x_r, y_r, z_r) положения малоразмерного БВС разностно-дальномерным методом [12] происходит в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x_r)^2 + (y_2 - y_r)^2 + (z_2 - z_r)^2} - \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2} = \Delta r_{21} \\ \sqrt{(x_3 - x_r)^2 + (y_3 - y_r)^2 + (z_3 - z_r)^2} - \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2} = \Delta r_{31} \\ \sqrt{(x_4 - x_r)^2 + (y_4 - y_r)^2 + (z_4 - z_r)^2} - \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 + (z_1 - z_r)^2} = \Delta r_{41} \end{cases}$$

где Δr_{j1} – разность расстояний, проходимых сигналом от j -го до 1-го приемников, $j=2,3,4$.

Значения трех разностей дальностей Δr_{j1} , $j=2,3,4$, от приемников до положения БВС с неизвестными координатами (x_r, y_r, z_r) определяются выражениями вида:

$$\Delta r_{j1} = \tau_{j1} \cdot c,$$

где c – скорость распространения сигнала;

τ_{j1} – задержка прихода сигнала на пункты приема.

Таким образом, описана сформированная имитационная система, обеспечивающая решение поставленных задач. Имитационная система разработана в среде LabVIEW.

Адекватность имитационной системы проверялась в реальных условиях при проведении натурального эксперимента. В ходе эксперимента сторонней организацией запускался заранее неизвестный малоразмерный БВС с заранее неизвестными сигналами радиомодема, находящегося на его борту.

В ходе проведения эксперимента алгоритмы обнаружения сигнала БВС на фоне интенсивных помех, протестированные с использованием разработанной имитационной системы, 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 видеоизображение, передаваемое обнаруженным сигналом с БВС. Никаких априорных данных о наличии видеосигнала и его параметрах не было. Принятые и декодированные сигналы были использованы затем для определения местоположения обнаруженного БВС.

3. Результаты численного эксперимента

Цель проведения численного эксперимента заключалась в определении возможности оценки степени уменьшения погрешности определения местоположения малоразмерного БВС в зависимости от различных условий, отличающихся положением БВС, направлением его движения и частотой излучаемого с его борта сигнала.

Для имитации работы системы определения местоположения малоразмерного БВС задавались различные тактические эпизоды, отличающиеся:

- направлением полета БВС;
- частотой сигнала.

Результатом имитации является:

- формирование зоны, в пределах которой возможно определение местоположения движущегося БВС с погрешностью в пределах заданной;
- оценка погрешности определения положения БВС в зависимости от параметров обработки сигналов.

В имитационной системе при проведении численных экспериментов моделировалось движение БВС, излучение и распространение сигналов цифрового телевидения, воспроизводилась обработка сигналов, оценка задержки прихода сигналов и определение местоположения БВС разностно-дальномерным методом.

Результаты расчетов зависимости снижения уровня сигнала с увеличением расстояния до БВС от 0 до 25 км на наиболее характерных частотах телевизионных сигналов: 1,080ГГц (сплошная линия), 711,25МГц (точечная линия), 191,25МГц (пунктирная линия) приведены на рисунке 4.

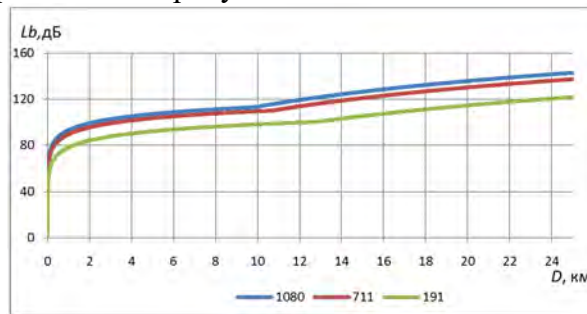


Рис. 4. Изменение потерь с увеличением расстояния

Для оценки размеров и положения зоны, в пределах которой возможно определение местоположения БВС, задавалась точка в пределах видимости со всех ПРП и рассматривались различные направления движения БВС из этой точки. Для двух значений частот сигнала (711,25МГц и 191,25МГц) оценивалась степень затухания и определялась видимость этого сигнала во всех пунктах приема. Если сигнал по пороговому значению мог быть принят всеми ПРП, то считалось, что БВС находится в зоне устойчивого приема сигнала, и его местоположение может быть определено.

На рис. 5 представлен результат построения зон для двух частот излучаемого сверхширокоимпульсного сигнала в условиях его затухания сигнала из-за сложного рельефа береговой черты. Красным цветом показана зона определения местоположения БВС при получении сигнала на частоте 711,25МГц, синим цветом – зона при получении сигнала на частоте 191,25МГц. Точками зеленого, желтого и красного цвета показаны положения ПРП.

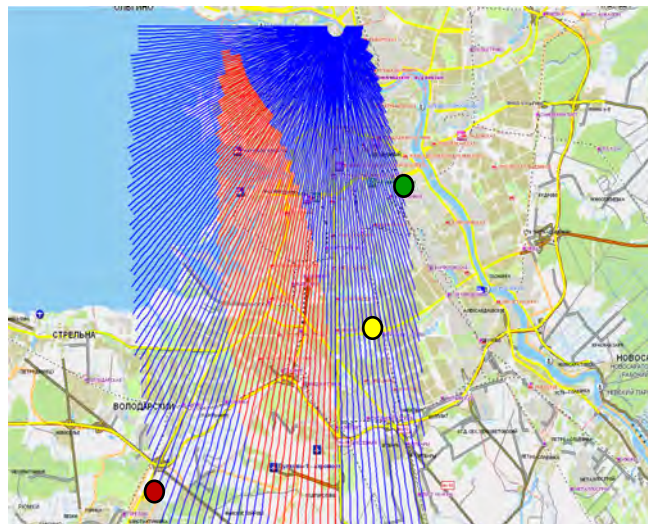


Рис.5. Положение зон, в пределах которых возможно определение местоположения БВС при приеме сигналов на частотах 711,25МГц (штриховка красного цвета) и 191,25МГц (штриховка синего цвета)

По сигналам, полученным от БВС при нахождении его в указанной зоне, решаем навигационную задачу и оцениваем погрешность определения местоположения БВС.

Для оценки степени влияния интерполяции кубическим сплайном при обработке сигналов на погрешность определения местоположения БВС рассмотрено движение

БВС курсом, при котором БВС достаточно длительное время находился в зоне устойчивого приема от него сигнала всеми ПРП, что позволяло решать навигационную задачу и определять местоположение БВС.

Моделировалось два варианта обработки сигналов: в первом варианте определялась разность прихода сигнала без использования интерполяции кубическим сплайном, во втором – с использованием интерполяции кубическим сплайном и уменьшением погрешности определения РМПС в 2 раза и в 4 раза. Результаты моделирования приведены на рисунке 6.

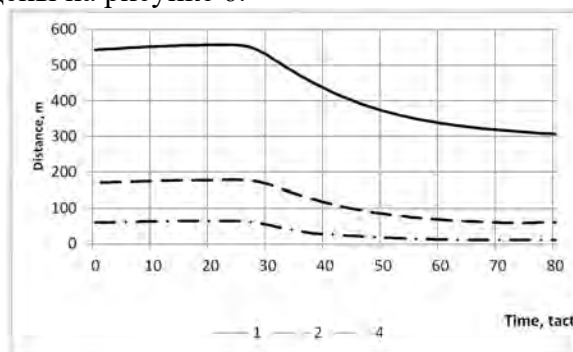


Рис. 6. Зависимость погрешности определения местоположения от дистанции между приемниками и БВС

Сплошная линия на рис. 6 соответствует погрешности определения местоположения в отсутствие интерполяции кубическим сплайном, пунктирная и штрих-пунктирная – с использованием интерполяции кубическим сплайном.

Результаты моделирования показали, что использование интерполяции кубическим сплайном при уменьшении шага дискретизации в 2 раза приводит к уменьшению в 3 раза погрешности определения местоположения БВС. Уменьшение шага дискретизации в 4 раза приводит к 7-кратному уменьшению погрешности определения местоположения БВС.

Таким образом, результаты моделирования позволили получить зависимость уменьшения погрешности определения местоположения БВС от погрешности определения задержек прихода сигналов на пространственно-распределенные пункты приема.

Выводы

В целях контроля несанкционированного полета малоразмерного беспилотного воздушного судна разработана имитационная система для тестирования алгоритмов обнаружения сверхширокополосного цифрового телевизионного сигнала, излучаемого с борта беспилотного воздушного судна, и определения его местоположения разностно-дальномерным методом. В имитационной системе воспроизводятся: затухание сигнала цифрового телевидения в условиях сложного рельефа прибрежной черты, движение беспилотного воздушного судна, уточнение разности прихода сигналов, решение навигационной задачи.

Разработанная имитационная система позволяет тестировать алгоритмы обнаружения сигнала малоразмерного беспилотного воздушного судна и дополнительную обработку сверхширокополосных сигналов с использованием интерполяции кубическим сплайном.

Результатами моделирования явились формирование зоны устойчивого приема сигнала цифрового телевидения всеми приемниками и определение степени снижения погрешности в результате использования интерполяции кубическим сплайном.

Адекватная имитация реальных сигналов цифрового телевидения дала возможность протестировать алгоритмы обнаружения сигналов БВС, что позволило в натуральных условиях реальной обстановки обнаружить заранее неизвестный сигнал на определенной частоте, воспроизвести видео, передаваемое в составе сигнала и определить местоположение малоразмерного беспилотного воздушного судна с погрешностью в пределах заданной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00803.

Авторы выражают благодарность Константину Ланцову и Валентину Ланцову за программную реализацию имитации системы определения местоположения малоразмерного робототехнического комплекса, а также за организацию и проведение натурального эксперимента.

Литература

1. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 50-58.
2. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 3 (88). – С. 47-57.
3. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28. № 2 (109). – С. 131-146.
4. **Gindraux S., Boesch R. and Farinotti D.** Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers // Remote Sensing. – 2017. – No. 9. – Pp. 186.
5. **Hung I.-K., Unger D., Kulhavy D. and Zhang Y.** Positional Precision Analysis of Orthomosaics Derived from Drone Captured Aerial Imagery // Drones. – 2019. – No. 3. – P. 46.
6. **Koeva M., Muneza M., Gevaert C., Gerke M. and Nex F.** Using UAVs for Map Creation and Updating: A Case Study in Rwanda // Survey Review. – 2018. – Vol. 50, No. 361. – P. 312-325.
7. **Mantey S. and Tagoe N.D.** Suitability of Unmanned Aerial Vehicles for Cadastral Surveys // Ghana Mining Journal. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 1-8.
8. **Ngadiman N., Kaamin M., Sahat S., Mokhtar M., Ahmad N.F.A., Kadir A.A. and Razali S.N.M.** Production of Orthophoto Map Using UAV Photogrammetry: A Case Study in UTHM Pagoh Campus // American Institute of Physics Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 2016, No. 1. – P. 1-6.
9. **Colomina I. and Molina P.** Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 92. – P. 79-97.
10. **Everaerts J.** The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Congress, Beijing, China. – 2008. – P. 1187-1192.
11. **Мартынова Л.А., 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.

12. **Волков Р.В., Дворников С.В., Саяпин В.Н., Симронов А.Н.** Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений. – СПб.: ВАС, 2013. – 115 с.

13. **Хохлов Н.С., Канавин С.В., Гилев И.В.** Типовые модели деструктивных широкополосных и сверхширокополосных сигналов, воздействующих на системы связи специального назначения // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. – № 1. – С. 91-101.

14. **Шахнович И.** Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера. 2004. – 168 с.

15. **Баженов А.В.** Радионавигационные системы: Учебное пособие. [Текст]/ А.В. Баженов, Г.И. Захаренко, А.Н. Бережнов, К.Ю. Савченко / Под ред. А.В. Баженова – Ставрополь: СВВАИУ(ВИ), 2007. – 202 с.

16. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.

17. Системы и средства для обнаружения беспилотников (БПЛА) // Электронный ресурс: <https://anti-dron.ru/blog/sistemy-i-sredstva-dlya-obnaruzheniya-bespilotnikov-i-effektivnost-ikh-primeneniya.html>. (Дата обращения 13.05.2022).

18. **Филин Е.Д., Киричек Р.В.** Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Том 6. № 2. – С. 87-93.

19. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // Электронный ресурс: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov>. (Дата обращения 13.05.2022).

20. **Макаренко С.И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам: Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.

21. **Сундучков К.С., Мальчук М.А., Кобзарь Л.С.** Методика определения оптимальной топологии сети GSM для городского микрорайона. [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/77/132/891.php>. (дата обращения 03.11.2022).