

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Клестова Мария Васильевна

**Определение с помощью беспилотных летательных аппаратов
координат источника радиоизлучения в условиях малых отношений
сигнал/шум**

Направление подготовки

11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

Код и наименование

Направленность

11.06.01_01 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Клестова Мария
Васильевна

Научный руководитель: проф., д.т.н.
Макаров Сергей Борисович

Санкт Петербург – 2018

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий (ВШПФиКТ) Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШПФиКТ:

Величко Елена Николаевна
к.т.н., доцент

Научный руководитель:

Макаров Сергей Борисович,
д.т.н., проф.

Рецензент:

Павлов Андрей Александрович,
к.т.н., без звания,
ФГБНУ "ГНТЦ "Наука"

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в радиолокации, для средств радиоэлектронной борьбы и противовоздушной обороны, а также при проведении поисково-спасательных работ, особенно в труднодоступных районах в условиях горно-лесистой местности, актуальной является задача определения координат источников радиоизлучения (ИРИ). В частности, большое распространение получила задача определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом, так как для его реализации не требуются многоканальные приёмники и сложные антенные системы, необходимо лишь знать координаты приёмных пунктов и обеспечивать их точную синхронизацию по времени.

В данной работе рассмотрен разностно-дальномерный метод определения положения источника радиоизлучения с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Проведен сравнительный анализ одноэтапного и двухэтапного (с учетом точек пересечения линий положения) алгоритмов. Алгоритмы исследуются в модели, написанной в среде MatLab, а также на реальных записях сигналов с двух БПЛА.

Цель и задачи исследования

Цель работы – повышение точности определения координат источника радиоизлучения на основе применения одноэтапного алгоритма (единой процедуры сопоставления первичных измеряемых параметров радиосигналов с координатами источника) при приеме сигналов ИРИ на БПЛА.

Для достижения данной цели в ходе работы решаются следующие задачи:

- исследование возможностей применения одноэтапного алгоритма определения местоположения ИРИ разностно-дальномерным методом;
- разработка имитационной модели в среде Матлаб для проведения сравнительного анализа алгоритмов;

- моделирование разностно-дальномерного метода местоопределения с обработкой результатов с применением одноэтапного и двухэтапного алгоритмов;
- исследование быстродействия алгоритмов;
- исследование эффективности реализованных алгоритмов на полунатурной модели в среде Матлаб с использованием реальных записей сигналов.

Научная новизна

1. Разработана новая методика определения местоположения источников радиоизлучения с использованием разностно-дальномерного метода
2. Предложено использовать комбинирование одноэтапного и двухэтапного алгоритмов определения местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом.
3. Разработана имитационная модель в среде MatLab, позволяющая исследовать точности определения местоположения ИРИ при разных значениях отношения сигнал/шум.
4. Проведены полунатурные испытания с использованием записей, полученных с беспилотных летательных аппаратов.
5. Разработаны рекомендации по применению метода определения местоположения источника: сначала применять двухэтапный алгоритм, затем, обозначив небольшую область вокруг вычисленной координаты источника, использовать одноэтапный для уточнения местоположения ИРИ

Теоретическая и практическая значимость

Предложенный способ применения одноэтапного алгоритма в комбинации с двухэтапным позволяет повысить точность определения координат источника радиоизлучения.

Повышение точности составило 190 м (с 250 м до 60 м) при малых отношениях сигнал/шум (12 дБ и менее).

Апробация работы

Результаты работы представлены на научно-практической межвузовской конференции с международным участием «Неделя Науки СПбГПУ» 2015, на международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» - DSPA 2016. Также по результатам работы опубликован патент РФ №2659808.

Публикации

1. Клестова М.В., Макаров С.Б. Повышение точности определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом / В сб. материалов 18-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» - DSPA, 2016.

2. Клишин А.В., Клестова М.В., Царик Д.В. Исследование моноимпульсного амплитудно-фазового метода пеленгования источников радиоизлучения // Успехи современной радиоэлектроники, 2017, №10, с.43-51.

3. Клестова М.В., Макаров С.Б. Повышение точности определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом / В сб. материалов межвузовской научной конференции «Неделя науки СПбГПУ», 2015.

4. Способ и устройство определения координат источника радиоизлучения: пат. 2659808 Рос. Федерация: МПК G01S 5/10 / Патентообладатель «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны РФ, ООО «СТЦ». Заявл. 05.07.2017; опубл. 04.07.2018, Бюл. №19. – 37 с.: ил.

5. Способ автоматизированного контроля источников радиоизлучений: пат. 2659813 Рос. Федерация: МПК G01S 3/02 / Патентообладатель «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны РФ, ООО «СТЦ». Заявл. 28.09.2017; опубл. 04.07.2018, Бюл. №19. – 21 с.: ил.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение.....	7
Цель и задачи	10
Одноэтапный алгоритм определения местоположения ИРИ.....	11
Моделирование одноэтапного и двухэтапного алгоритмов	13
Полунатурное моделирование методов с использованием реальных записей сигналов.....	15
Оценка быстродействия предложенных алгоритмов	16
Заключение	17
Список использованных источников	18
Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации).....	19

Введение

В настоящее время вопросы теории и практики измерения координат объектов находят широкое применение в различных отраслях науки и производства (в радионавигации, радиолокации, радиоуправлении, радиоастрономии, для средств радиоэлектронной борьбы и противовоздушной обороны). Важным направлением данной научной области является задача определения координат источников радиоизлучения (ИРИ).

В зависимости от способа определения координат различают следующие основные системы местоопределения: угломерные, дальномерные, угломерно-дальномерные, разностно-дальномерные, суммарно-дальномерные. Большое распространение получила задача определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом, так как для его реализации не требуются многоканальные приёмники и сложные антенные системы, необходимо лишь знать координаты приёмных пунктов и обеспечивать их точную синхронизацию по времени [1].

В России в настоящее время в интересах радиотехнического контроля радиолокационных средств активно используются малогабаритные беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Использование разностно-дальномерного метода на базе БПЛА позволяет расширить зону обнаружения и определения координат ИРИ.

Разностно-дальномерный метод определения местоположения ИРИ основан на измерении разностей расстояний от источника до приемного устройства. Эти разности находят путем измерения корреляционным методом относительных временных задержек, каждой из которых соответствует линия положения в виде гиперболы (рисунок 1а) [2].

Облучение двух приемных пунктов позволяет измерить одну разность задержек и определить одну гиперболу. Вторая гипербола находится по разности задержек в другом плече системы. Если эти задержки измеряются

по разным реализациям сигнала, то возникает проблема различения гипербол на предмет принадлежности их к одному источнику радиоизлучения, которую трудно разрешить в сложной радиоэлектронной обстановке. Поэтому на практике базовый разнос в системе выбирают исходя из необходимости облучения источниками всех приемных пунктов одновременно.

Для определения положения источника требуется не менее трех разнесенных стационарных приемных устройств [2]. В случае применения БПЛА достаточно двух приёмных устройств, находящихся на борту. Тогда при движении БПЛА синхронно записываются выборки сигнала источника. Каждая запись позволяет найти относительную временную задержку и построить гиперболу. Из пересечения множества гипербол находится координата ИРИ (рисунок 1б).

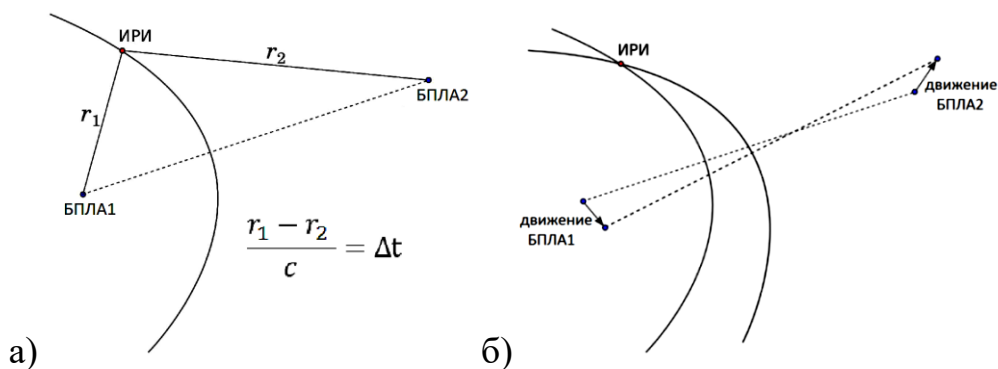


Рис. 1. Иллюстрация применения разностно-дальномерного метода при использовании БПЛА а) измерение разностей расстояний от источника до приемного устройства; б) определение координаты ИРИ по пересечению гипербол.

Данный алгоритм определения местоположения источника является двухэтапным. На первом этапе производится вычисление задержек, которые соответствуют максимуму функции взаимной корреляции сигналов, принятых на БПЛА, и строятся линии положения – гиперболы. На втором этапе производится вычисление всех возможных значений координат точек

пересечения. Затем по полученному массиву координат определяется местоположение ИРИ.

Погрешности, возникающие при вычислении относительных временных задержек и определении каждой линии положения, приводят к тому, что вычисленное положение источника отличается от истинного.

Наряду с алгоритмом, приведенным выше, используется также одноэтапный алгоритм определения координат. При переходе к одноэтапной обработке принятых радиосигналов не осуществляется предварительное измерение задержек, связанных с измеряемыми координатами. Таким образом, основным отличием одноэтапного алгоритма от двухэтапного является то, что оцениваемые параметры представляют собой непосредственно координаты ИРИ, а измерение промежуточных параметров (линий положения – гипербол) не проводится. Определение местоположения источника здесь рассматривается как единая процедура сопоставления первичных параметров с координатами ИРИ [3].

Цель и задачи

Описанные алгоритмы имеют свои преимущества и недостатки применительно к конкретно поставленной задаче определения положения ИРИ с БПЛА. В литературе ранее не был исследован вопрос сравнения точности предложенных алгоритмов для данной задачи, и нельзя сделать обоснованного выбора в пользу того или иного алгоритма. Поэтому важным является проведение сравнительного анализа этих методов.

Цель работы - повышение точности определения координат источника радиоизлучения на основе применения двухэтапного и одноэтапного алгоритмов при приеме сигналов ИРИ на БПЛА.

Для достижения данной цели в ходе работы решаются следующие задачи:

- исследование возможностей использования одноэтапного и двухэтапного алгоритмов определения местоположения ИРИ применительно к разностно-дальномерному методу;
- разработка имитационной модели в среде Матлаб для проведения сравнительного анализа алгоритмов;
- моделирование разностно-дальномерного метода местоопределения с обработкой результатов с применением одноэтапного и двухэтапного алгоритмов;
- исследование быстродействия алгоритмов;
- исследование эффективности реализованных алгоритмов на полунатурной модели в среде Матлаб с использованием реальных записей сигналов.

Одноэтапный алгоритм определения местоположения ИРИ

Рассмотрим одноэтапный алгоритм нахождения координаты ИРИ разностно-дальномерным методом, в котором оцениваемыми параметрами служат непосредственно координаты излучателя, а вычисление промежуточных параметров, то есть точек пересечения гипербол, не проводится. При работе одноэтапного алгоритма все пространство поиска (в данном случае заданная зона облета БПЛА) разбивается на ячейки (их размеры выбираются в зависимости от ожидаемой точности определения местоположения), и для каждой из них вычисляется решающая функция. Та ячейка, для которой значение этой функции максимально, и есть оценка местоположения ИРИ. Данный алгоритм позволяет повысить достоверность оценки координат при низких отношениях сигнал/шум на входе устройства оценивания первичных параметров [4].

Обобщенная схема работы приемного устройства при работе разностно-дальномерного метода местоопределения представлена на рисунке 2. Система, реализующая разностно-дальномерный метод местоопределения ИРИ, содержит пространственно разнесенные пункты приёма, установленные на БПЛА1 и БПЛА2. Каждый из них включает приёмную антенну и радиоприёмное устройство. Принятые выборки сигналов x_n и y_n через аппаратуру передачи данных поступают на центральный пункт обработки, где вычисляется координата ИРИ.

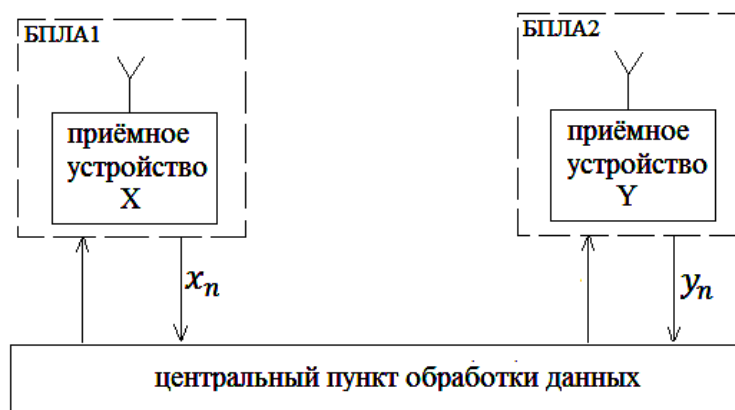


Рис. 2. Блок-схема работы приёмного устройства при использовании разностно-дальномерного метода

Для определения координаты источника задается зона поиска, в которой предположительно находится ИРИ, и в каждой точке данной зоны определяются значения модуля комплексных взаимных корреляционных функций R_{norm} , соответствующие задержкам прихода сигналов, и усредняются по количеству пар радиосигналов со всех приёмных пунктов. По совокупности всех точек пространства определяют максимальное значение решающей статистики и координату источника. Схема работы вычислителя приемного устройства для работы одноэтапного алгоритма местоопределения будет иметь следующий вид, представленный на рис 3:

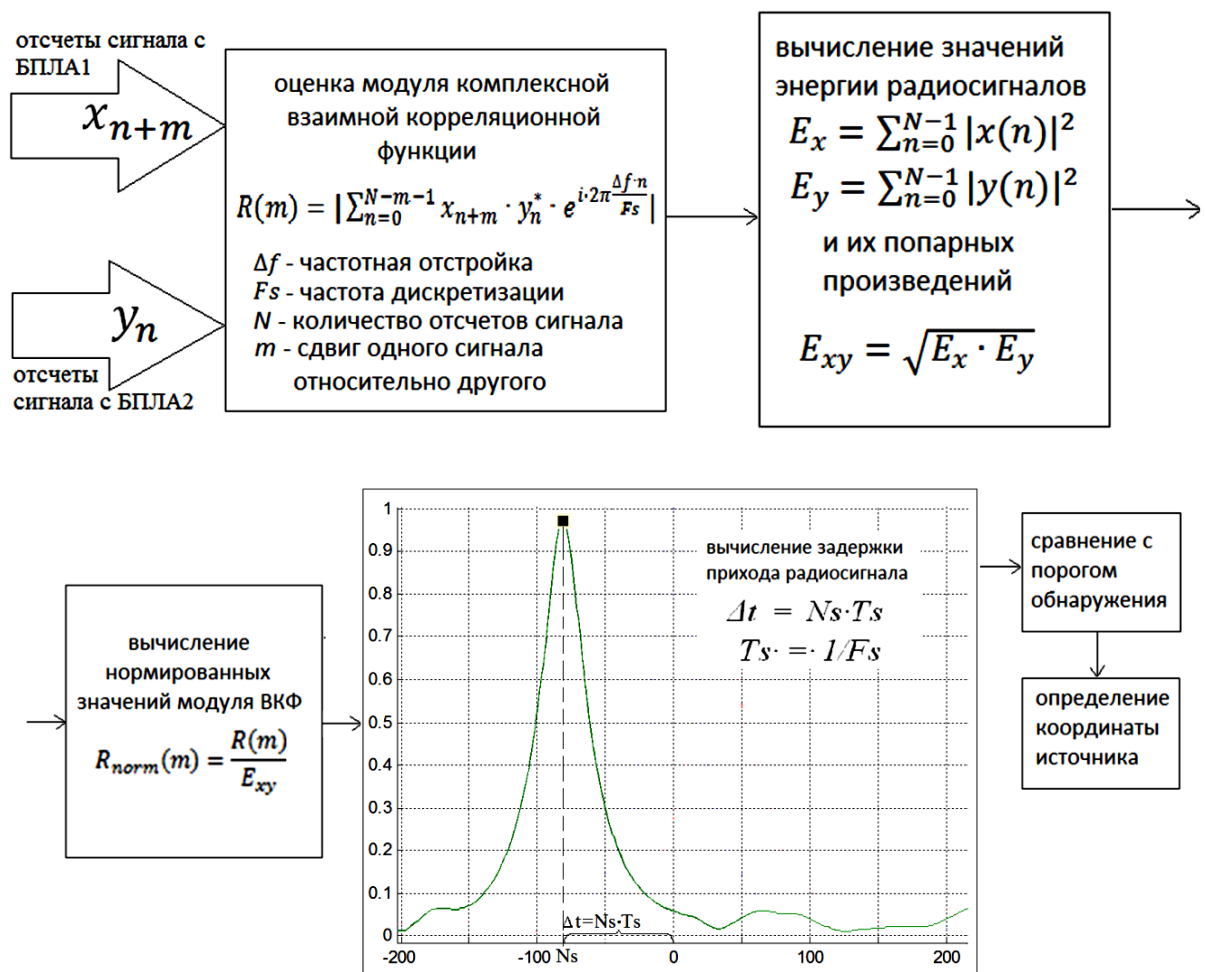


Рис. 3. Блок-схема вычисления координаты ИРИ с использованием одноэтапного алгоритма

Моделирование одноэтапного и двухэтапного алгоритмов

Точность определения координат зависит от уровня шума на входе приемного устройства [5]. Оценим влияние отношения сигнал/шум на точность местоопределения с использованием математической модели в среде MatLab. Исходными данными для модели являются:

- траектории движения БПЛА, которые представляют собой круги радиусом 1,5 км с центрами на расстоянии порядка 3 км от источника (рисунок 4);
- сигнал с полосой 4 МГц, центральной частотой 1 ГГц.

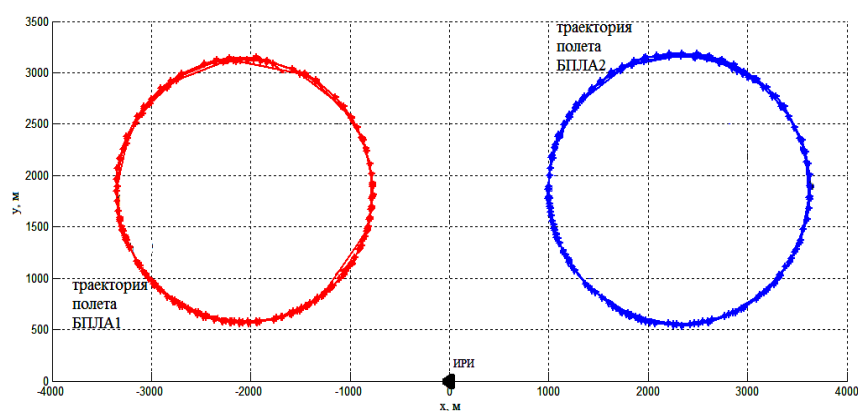


Рис. 4. Траектория движения БПЛА

На рисунке 5 показана зависимость ошибки местоопределения (в метрах) от различного уровня сигнал/шум на входе приёмного устройства:

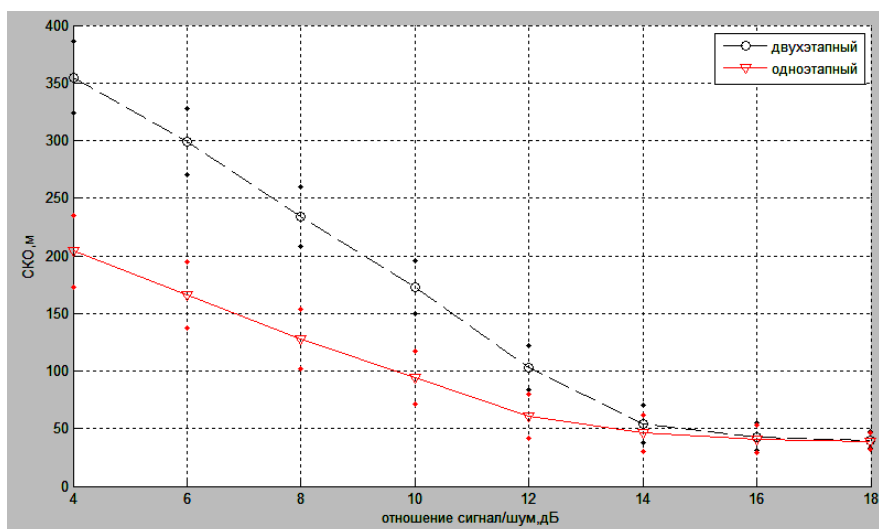


Рис. 5. Зависимость ошибки местоопределения от уровня сигнал/шум

Из представленного выше графика можно сделать вывод, что алгоритмы одноэтапной и двухэтапной обработки имеют сравнительно одинаковую точность при значениях отношения сигнал/шум выше 12 дБ. При более низких значениях сигнал/шум одноэтапный алгоритм даёт более высокую точность при оценивании координаты источника радиоизлучения.

Данный результат объясняется тем, что при использовании одноэтапного алгоритма оценивается не максимум взаимных корреляционных функций по времени, а только значения этих функций, причем в известных точках (расчетных значениях запаздываний). Таким образом, устраняются погрешности первичных измерений линий положения, что приводит к увеличению точности определения координат.

Полунатурное моделирование методов с использованием реальных записей сигналов

Полученные результаты были проверены с использованием реальных записей сигналов, полученных при полёте БПЛА. В среде MatLab была построена полунатурная имитационная модель, работающая с реальными записями. Исходными данными для полунатурной имитационной модели являются синхронно записанные выборки сигнала источника и координаты приемных пунктов на БПЛА. Летательные аппараты при этом перемещались по траектории, обозначенной на рисунке 4.

После обработки записей сигналов были получены следующие результаты работы алгоритмов местоопределения:

- ошибка в вычислении координаты ИРИ для одноэтапного алгоритма составила 60 м;
- ошибка в вычислении координаты ИРИ для двухэтапного алгоритма составила 250 м.

Таким образом, в результате обработки реальных данных было показано преимущество одноэтапного метода. Так как при реальных испытаниях отношение сигнал/шум на входе приемного устройства обычно не превышает значение 12 дБ, то из-за достаточно больших ошибок в определении точек пересечения линий положения точность двухэтапного алгоритма оказывается ниже.

Оценка быстродействия предложенных алгоритмов

Время работы двухэтапного алгоритма зависит только от количества синхронно сделанных при помощи БПЛА измерений (т. е. от количества точек пересечения линий положения). В случае же одноэтапного алгоритма необходимо учитывать размер заданной зоны облета, в которой предположительно находится ИРИ.

Обозначим $M_{изм}$ – число сделанных измерений, K – число точек обхода обозначенной зоны. В каждой такой точке определяется значение модуля комплексной взаимной корреляционной функции. Тогда объем вычислений для двухэтапного алгоритма будет пропорционален $M_{изм}^2$, для одноэтапного – пропорционален $K^2 \cdot M_{изм}$. Таким образом, при достаточно большой зоне облета БПЛА одноэтапный алгоритм будет проигрывать в быстродействии.

Таким образом, целесообразно произвести комбинирование данных двух алгоритмов: сначала применить двухэтапный, затем, обозначив небольшую область вокруг вычисленной координаты источника, использовать одноэтапный для уточнения местоположения ИРИ.

Заключение

В рамках выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

- исследованы возможности использования одноэтапного и двухэтапного алгоритмов определения местоположения ИРИ разностно-дальномерным методом;
- разработана имитационной модели в среде Матлаб для проведения сравнительного анализа алгоритмов;
- проведено моделирование разностно-дальномерного метода местоопределения с обработкой результатов с применением одноэтапного и двухэтапного алгоритмов;
- проведено исследование быстродействия алгоритмов;
- исследована эффективности реализованных алгоритмов на полунатурной модели в среде Матлаб с использованием реальных записей сигналов.

Список использованных источников

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 624 с.: ил.
2. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы/ Ю.М. Казаринов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с.
3. Способ определения местоположения источников радиоизлучения: пат. 2516432 Рос. Федерация // Уфаев В.А., Уфаев Д.В. Оpubл. 20.05.2014.
4. Устинов К.В. Адаптивная пространственная фильтрация в системах местоопределения источников радиоизлучений // Антенны – 2011 – №1(164) – с. 13-15.
5. Способ обнаружения и определения координат источника радиоизлучения: пат. 2285937 Рос. Федерация // Уфаев В.А., Уфаев Д.В., Афанасьев В.И., Чикин М.Г. Оpubл. 20.10.2006.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Клишин А.В., Клестова М.В., Царик Д.В. Исследование моноимпульсного амплитудно-фазового метода пеленгования источников радиоизлучения // Успехи современной радиоэлектроники, 2017, №10, с.43-51.

Публикации в других изданиях

1. Клестова М.В., Макаров С.Б. Повышение точности определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом / В сб. материалов 18-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» - DSPA, 2016.
2. Клестова М.В., Макаров С.Б. Повышение точности определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом / В сб. материалов межвузовской научной конференции «Неделя науки СПбГПУ», 2015.
3. Способ и устройство определения координат источника радиоизлучения: пат. 2659808 Рос. Федерация: МПК G01S 5/10 / Патентообладатель «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны РФ, ООО «СТЦ». Заявл. 05.07.2017; опубл. 04.07.2018, Бюл. №19. – 37 с.: ил.
4. Способ автоматизированного контроля источников радиоизлучений: пат. 2659813 Рос. Федерация: МПК G01S 3/02 / Патентообладатель «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны РФ, ООО «СТЦ». Заявл. 28.09.2017; опубл. 04.07.2018, Бюл. №19. – 21 с.: ил.

Аспирант _____ Клестова Мария Васильевна

(подпись)