

Санкт-Петербургский государственный университет

Программная Инженерия  
Кафедра Системного Программирования

Гамаонов Алан Батразович

# Определение местоположения источника сигнала разностно-дальномерным методом

Производственная практика

Научный руководитель:  
ст. преп. Кафедры СП Я. А. Кириленко

Консультант:  
ст. инженер АО «НИИ СТТ»  
к. т. н., доцент А. Б. Натальин

Санкт-Петербург  
2021

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1. Цели и задачи</b>	<b>4</b>
<b>2. Обзор предметной области</b>	<b>5</b>
2.1. Методы определения координат источника сигнала . . .	5
2.1.1. Угломерный метод . . . . .	5
2.1.2. Разностно-дальномерный метод . . . . .	5
2.1.3. Угломерно-разностно-дальномерный . . . . .	6
2.1.4. Однопозиционный метод . . . . .	6
2.1.5. Вывод . . . . .	7
<b>3. Инструменты</b>	<b>8</b>
3.1. MATLAB . . . . .	8
3.2. Curve intersections . . . . .	8
<b>4. Реализация</b>	<b>9</b>
4.1. Исходные данные . . . . .	9
4.2. Алгоритм . . . . .	9
4.2.1. Вычисление задержки приёма сигнала . . . . .	9
4.2.2. Определение местоположения источника сигнала	10
4.3. Точность измерений . . . . .	11
<b>Заключение</b>	<b>13</b>
<b>Список литературы</b>	<b>14</b>

# Введение

За последние десятилетия требования к радиолокационным системам резко повышаются. Речь идёт как об увеличении дальности действия, так и о значительном увеличении точности.

Характерной задачей для систем радионавигации является определение местоположения источника радиосигнала. Такая потребность возникает в самых различных областях: от спутниковой связи [1], до управления движением ракет [3], а также во многих других случаях.

Для решения этих проблем на практике, как правило, применяются способы, основывающиеся на одном из следующих методов.

- Разностно-дальномерный.
- Угломерный

У каждого из описанных методов имеются свои достоинства и недостатки, а также требования к оборудованию, поэтому выбор метода определения местоположения источника сигнала сильно зависит от многих факторов. К примеру, искажения фронта волны из-за вторичных излучений от локальных препятствий, отражения от земли и изменения проводимости почвы. В городских же условиях следует также учитывать эффект затенения от высоких строений, а в помещениях принимать в расчёт тот факт, что приёмники расположены на небольшом расстоянии друг от друга. Кроме проблемы выбора места, приходится учитывать сложность системы, требования к оборудованию и точности определения местоположения, а также форму излучаемого источником сигнала.

Как можно видеть, в каждом конкретном случае определение местоположения источника сигнала – задача, в некотором роде, уникальная, а потому требует особого подхода. Таким образом возникает необходимость решения этой задачи в предоставленной конфигурации.

# 1. Цели и задачи

Целью данной работы является разработка программного обеспечения, позволяющего определить координаты неподвижного источника сигнала, зная местоположение приёмников этого сигнала. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи.

1. Ознакомление с основами цифровой связи и обработки сигналов.
2. Реализация алгоритма определения местоположения источника сигнала в MATLAB.
3. Отображение полученных координат на интерактивной карте.
4. Измерение точности полученных результатов.

## **2. Обзор предметной области**

### **2.1. Методы определения координат источника сигнала**

В этой секции рассматриваются основные идеи, а также достоинства и недостатки методов определения местоположения источника радиосигнала.

#### **2.1.1. Угломерный метод**

Угломерный (или пеленгационный) метод основан на использовании направленных свойств антенн. Зная местоположение двух радиомаяков, можно установить местоположение радиопеленгатора. Радиопеленгатор измеряет азимуты углов обоих маяков, таким образом, построив прямые под этими углами, можно найти координаты пеленгатора.

Согласно всё тому же отчёту МСЭ-R SM. 2211-2 [2], подобные системы более эффективно работают как с узкополосными и немодулированными сигналами, так и с широкополосными. Однако, для эффективного применения данного метода требуется приблизительно знать местоположение источника сигнала, а также располагать достаточно сложной антенной системой. Более существенными недостатками метода являются: наличие большого количества ложных обнаружений несуществующих источников при большом количестве излучающих объектов в зоне действия пеленгатора, низкая точность измерения координат и работа по непрерывному излучению [6, 15].

Впрочем, ситуацию несколько исправляют алгоритмы повышения точности оценки пеленга [11, 10].

#### **2.1.2. Разностно-дальномерный метод**

Суть разностно-дальномерного метода заключается в определении местоположения источника сигнала путём измерения времени прихода сигнала в различные точки пространства. Для каждой такой точки

(приёмника) сравнивается разность во времени прихода. Зная местоположение всех приёмников, можно найти местоположение источника сигнала [14].

Согласно отчёту Международного Союза Электросвязи МСЭ-R SM. 2211-2 [2], основными достоинствами данного метода (относительно угломерного) являются более простые требования к антенне, а также к выбору места и калибровке. К основным недостаткам же относятся чувствительность к источникам декорреляции сигнала и потребность в более точной синхронизации приёмников по времени. Кроме того, рассмотренному методу присуща проблема обнаружения ложных несуществующих источников радиоизлучения в тех случаях, когда источник излучает периодические сигналы с малым периодом следования [6, 12].

### **2.1.3. Угломерно-разностно-дальномерный**

Более перспективным является третий метод определения координат источников излучения – угломерно-разностно-дальномерный. Он не обнаруживает несуществующие источники сигнала, в отличие от двух предыдущих [6].

Угломерно-разностно-дальномерный метод основан на измерении угловых направлений на источник излучения и разности расстояний от него до приемных пунктов. В простейшем случае достаточно иметь два приемных пункта.

Для определения плоскостных координат следует измерить только азимут и разность расстояний от пунктов приема до цели. Местоположение цели определяется точкой пересечения прямой и гиперболы.

### **2.1.4. Однопозиционный метод**

Описанные выше методы требуют наличия нескольких опорных точек для своей работы, а также обеспечения стабильной связи между ними. Этот фактор сводит на нет возможность скрытой работы системы и естественным образом порождает потребность в уменьшении разноса приёмников сигнала в пространстве.

Однопозиционный метод определения местоположения источника сигнала основывается на отражении сигналов от объектов, находящихся в зоне работы системы [13].

Очевидным и серьёзным недостатком такой системы заключается в том, что принятый сигнал содержит информацию обо всех объектах, что попали в зону действия системы, а, следовательно, точно определить от какого объекта произошло отражение сигнала становится крайне проблематично.

### **2.1.5. Вывод**

Учитывая изначальные условия поставленной задачи, а также принимая во внимание особенности описанных методов, в данной работе был выбран разностно-дальномерный метод определения координат, так как он накладывает меньшие ограничения на используемые антенны, что позволяет применять более простые и дешёвые модели, а также избавляет от необходимости их тонкой калибровки. Также, не зная примерного местоположения источника сигнала, задача наведения узконаправленной антенны становится неоправданно трудоёмкой, вследствие чего использование разностно-дальномерного метода с применением широкоугольных антенн остаётся единственным вариантом.

## 3. Инструменты

### 3.1. MATLAB

MATLAB – это пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений, разрабатываемый компанией MathWorks.

MATLAB предоставляет множество функций для работы с числами, функциями и массивами данных, а также позволяет легко строить графики функций и даже отображать координаты на интерактивных картах (начиная с версии R2018b). Так как данная работа является первым шагом в моделировании описанной выше системы, MATLAB был выбран как наиболее гибкий инструмент в плане отладки и визуализации данных.

### 3.2. Curve intersections

Curve intersections [5] – это скрипт на MATLAB, реализующий функцию InterX, находящую пересечения кривых в пространстве. Он был выбран в качестве альтернативы функции PolyXPoly из пакета Matlab Mapping Toolbox [4], так как обеспечивает необходимую функциональность и не требует покупки и загрузки целого пакета.



## 4. Реализация

### 4.1. Исходные данные

Источник транслирует радиосигнал с частотой дискретизации 50 МГц. На местности расположены три приёмника, снабжённых модулями GPS и опорными генераторами, работающими на частоте 200 МГц. Приёмники расположены треугольником с длиной ребра порядка одного километра вокруг стационарного источника сигнала. Каждый приёмник в ходе записи создаёт текстовый файл, в который вносится информация о дате, времени начала записи, а также текущих координатах. Кроме того, вносится информация о количестве периодов дискретизации между двумя соседними Pulse Per Second (PPS) импульсами, приходящими от GPS-модуля и число, характеризующее сдвиг PPS-импульса внутри одного периода дискретизации. Далее до конца файла записываются отсчёты принимаемого сигнала.

### 4.2. Алгоритм

На вход поступает 100 записей, каждая запись – это тройка файлов, предоставленных приёмниками сигнала. На предварительном этапе считываются данные о местоположении (широта и долгота) и времени начала записи, если это время отличается в любых двух файлах, вся запись игнорируется. В противном случае вычисляется относительная задержка прихода сигнала для каждой пары приёмников. Зная эту задержку, можно найти местоположение источника сигнала.

#### 4.2.1. Вычисление задержки приёма сигнала

Считая, что PPS-импульсы приходят с достаточно стабильной частотой и зная количество периодов дискретизации сигнала между двумя импульсами, можно измерить собственную частоту приёмника, получив отклонение от номинала (200 МГц) – величина  $\Delta F$ . В данной конфигурации высокочастотная часть, которая переносит сигнал по ча-

стоте и низкочастотная, которая занимается дискретизацией сигнала работают от одного опорного сигнала. Исходя из этого, частота дискретизации и частотное смещение самого источника связаны линейно. Учитывая эти особенности, происходит поправка по частоте. То есть каждая запись смещается по частоте на добавку, которая характеризуется числом  $\Delta F$ . Таким образом получаем запись сигнала, которая сдвинута по частоте и поправлена по частоте дискретизации.

Далее ищем саму задержку. Она вычисляется довольно просто: в некотором диапазоне сдвигов двух записей сигнала ищется максимум взаимнокорреляционной функции. Соответственно, положение максимума этой функции и является задержкой приёма исходного сигнала. Эта величина выражена в отсчётах сигнала, но, зная частоту дискретизации, легко выразить её в наносекундах.

На последнем этапе вычисления задержки происходит ещё одна поправка. Так как опорный генератор приёмника и PPS-импульсы, приходящие от GPS-модуля никак не синхронизированы, появляется необходимость это сделать, чтобы запись сигнала начиналась одновременно с пришедшим импульсом. Для этого приёмник записывает в файл некоторое число  $\tau$ , которое характеризует задержку PPS-импульса относительно времени начала записи. Величина  $\tau$  кратна одной восьмой периода дискретизации сигнала и на эту величину происходит поправка на финальном этапе вычисления задержки приёма сигнала.

#### 4.2.2. Определение местоположения источника сигнала

Прежде всего необходимо перенести координаты приёмников на декартову систему координат. Для этого необходима некоторая опорная точка, в качестве которой принимается усреднение по широте (и долготе, соответственно) координат приёмников. Эта точка будет являться началом координат. Далее вычисляются координаты приёмников на плоскости по следующим формулам.

$$Y_A = (lat_A - lat_0) \cdot mpd_{lat} \quad (1)$$

$$X_A = (lon_A - lon_0) \cdot mpd_{lon} \quad (2)$$

Где

$lat_A$  ( $lon_A$ ) – широта (долгота) источника  $A$

$lat_0$  ( $lon_0$ ) – широта (долгота) опорной точки

$mpd_{lat} = 111135$  – количество метров в одном градусе широты

$mpd_{lon} = mpd_{lat} \cdot \cos(\frac{lat_0 \cdot \pi}{180})$  – количество метров в одном градусе долготы.

Далее,  $\Delta t_{AB}$  – задержка прихода сигнала в приёмник  $A$  относительно приёмника  $B$ . Эта величина вычислена в наносекундах. Так как радиоволна в воздухе распространяется со скоростью, близкой к скорости света, разница расстояний от источника до приёмников  $A$  и  $B$  (в метрах) вычисляется следующим образом:

$$\Delta l_{AB} = \Delta t_{AB} \cdot 10^{-9} \cdot C \quad (3)$$

Где  $C = 299792458$  м/с – скорость света.

Зная эти величины, можно построить гиперболу  $H_{AB}$ :

$$\sqrt{(x - X_A)^2 + (y - Y_A)^2} - \sqrt{(x - X_B)^2 + (y - Y_B)^2} = \Delta l_{AB} \quad (4)$$

Построив подобным образом все три гиперболы ( $H_{AB}$ ,  $H_{AC}$  и  $H_{BC}$ , соответственно), с помощью функции InterX находим их точки пересечения. В силу погрешностей, гиперболы пересекаются не в одной точке, а в трёх, в следствие чего необходимо найти центр масс треугольника, вершинами которого являются точки пересечения. Этот центр масс и является примерным местоположением источника сигнала. [14]

### 4.3. Точность измерений

Как показали измерения, PPS-импульсы от GPS-модулей приходят на все три приёмника почти одновременно – погрешность не превышает 100 нс, что является отличным результатом для текущей задачи.

Таблица 1: Погрешность определения местоположения источника и приёмников сигнала (в метрах).

Метоположение	Макс. отклонение	Мат. ожидание	Дисперсия
Источник	7.14	3.52	2.08
Приёмник А	0.67	0.26	0.02
Приёмник В	1.33	0.61	0.12
Приёмник С	0.17	0.09	0.01

Результаты, представленные в Таблице 1 были получены на основе ста записей. Погрешность определения местоположения приёмников была вычислена на основе их координат, которые фиксирует GPS-модуль в начале записи, а источника – на основе координат, полученных после выполнения описанного выше алгоритма. Все величины указаны в метрах.

## Заключение

В результате работы были выполнены следующие задачи.

1. Произведено ознакомление с основами цифровой связи и обработки сигналов.
2. Реализован алгоритм определения местоположения источника сигнала в MATLAB.
3. Произведён вывод полученных координат на интерактивную карту.
4. Измерена точность полученных результатов.

У данной работы имеются дальнейшие перспективы развития: повышение точности определения оценки времени задержки между сигналами [7, 8], определение координат движущегося объекта, в том числе с помощью спутников [9], а также работа с сигналами более сложной формы.

## Список литературы

- [1] A. Aubain, B. Lobert. Method of locating an interfering transmitter for a satellite telecommunications system. // US Patent no. 6417799. — 2002.
- [2] ITU-R. Comparison of Time-Difference-of-Arrival and Angle-of-Arrival Methods of signal geolocation. — 2018. — URL: [www.itu.int/pub/R-REP-SM.2211-2-2018](http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2211-2-2018) (дата обращения: 27.04.2021).
- [3] J. Dillman D. J., Method and apparatus for using anti-jam technology to determine the location of an electromagnetic radiation source. // US Patent no. 6839017. — 2005.
- [4] MathWorks. Mapping Toolbox. — 2021. — URL: [www.mathworks.com/products/mapping.html](http://www.mathworks.com/products/mapping.html) (дата обращения: 13.05.2021).
- [5] NS. Curve intersections. — 2010. — URL: [www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22441-curve-intersections](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22441-curve-intersections) (дата обращения: 13.05.2021).
- [6] В. П. Бердышев Е. Н. Гарин А. Н. Фомин. Под общ. ред. В.П. Бердышева. Радиолокационные системы: учеб. // Красноярск: Сиб. федер. ун-т. — 2011 - 400 с.
- [7] В.Г. Пальчик О.В. Андреев. Обработка данных триангуляционного измерения. Цифровая обработка сигналов и ее применение; сборник докладов VI международной конференции. — Москва, 2004.
- [8] Е.П. Ворошилин В.А. Громов М.В. Миронов. Определение времени задержки приема сигналов группировкой пространственно-разнесенных малых космических аппаратов. — 2020. — URL: [http://www.mivlgu.ru/site\\_arch/conf/murom2010/materials/KRL2010/section1/10.pdf](http://www.mivlgu.ru/site_arch/conf/murom2010/materials/KRL2010/section1/10.pdf) (дата обращения: 20.10.2021).
- [9] Ершов Р.А. Морозов О.А. Определение местоположения источника радиоизлучения на поверхности земли по данным группы из

двух космических аппаратов // Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, с.292-297. — 2019.

- [10] Лаврентьева А.С. Фидельман В.Р. Чуманкин Ю.Е. Оценка погрешности пеленга, обусловленной отсутствием учета деформации рефлектора антенны // Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, с.353-356. — 2019.
- [11] Логинов А.А. Морозов О.А. Семенова М.Ю. Алгоритмы повышения точности оценки пеленга в задаче амплитудной моноимпульсной пассивной локации // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского №5(2), с.358-362. — 2010.
- [12] М. Скольник Р. Справочник по радиолокации. // Сов. Радио. — 1976.
- [13] П. А. Полянских А. А. Мещеряков В. П. Денисов А. А. Гельцер. Однопозиционный метод определения координат источника радиоизлучения на земных трассах по совокупности отражений его сигнала от местных предметов. — Журнал радиоэлектроники, №8, 2021. — URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug21/6/abstract.html>.
- [14] П.А. Бакулев. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. // Радиотехника. — 2004.
- [15] Я Аверьянов В. Разнесенные радиолокационные станции и системы. // Минск: Наука и техника. — 1978.