


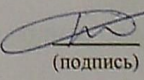

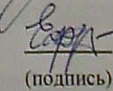
Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные системы»  
Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
Байкенов А.С.  
«\_\_\_» января 2015 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: «Оценка мощности распространения сигнала в бистатистических РЛС»

Выполнил	<u>магистрант гр. МТСП-13-1</u>	 (подпись)	Кузубаев Р.Г. (Ф.И.О.)
Руководитель	<u>д.т.н., профессор</u> (ученая степень, звание)	 (подпись)	Рутгайзер О.З. (Ф.И.О.)
Рецензент	<u>к.т.н., доцент</u> (ученая степень, звание)	_____ (подпись)	Липская М.А. (Ф.И.О.)
Нормоконтроль	<u>ассистент</u> (ученая степень, звание)	 (подпись)	Зайцев Е.О. (Ф.И.О.)
Вычислительная техника	<u>к.т.н., ст. преподаватель</u> (ученая степень, звание)	 (подпись)	Ефремова Ю.И. (Ф.И.О.)

Алматы, 2015

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет Радиотехника и связь  
Кафедра Телекоммуникационные системы  
Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Кузубаеву Радмиру Галиуллаевичу  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации: «Оценка мощности распространения сигнала в бистатических РЛС»

утверждена Ученым советом университета №      от «      »      201      г.

Срок сдачи законченной диссертации «      »      2015 г.

Цель исследования: разработка системы определения местоположения объекта вблизи базовой линии бистатической РЛС

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

- 1 Состояние проблем радиолокации;
- 2 Определение положения цели в бистатических РЛС;
- 3 Экспериментальное исследование мощности распространения сигнала в бистатических РЛС;
- 4 Моделирование распространения радиосигнала вблизи базовой линии БРЛС;
- 5 Техническая реализация. Описание изобретения.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1 Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для футбольного поля;
- 2 Характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта по БЛ, на расстоянии 0,2м, 0,4м и 0,6 м от БЛ;
- 3 Характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от приближающегося объекта;
- 4 Рисунок 4.1 – Форма ЗО;
- 5 Рисунок 4.2 – Схема организации многопозиционной РЛС;
- 6 Моделирование определения пересечения объектом КЗ;
- 7 Рисунок 5.1 – Схема организации системы



Рекомендуемая основная литература:

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – ВирТА, 1984. – 410с.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М. «Сов. радио», 1975. – 336 с.
3. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
4. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Алгоритм определения координат цели в просветном радиолокаторе с разнесенным приемом // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. – 2014, № 1.
5. Ковалев Ф. Н., Кондратьев В.В. Особенности угломерно-дальномерного метода определения местоположения цели в просветных бистатических радиолокаторах // Журнал радиоэлектроники. – 2014. №4.

ГРАФИК  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1 Состояние проблем радиолокации	декабрь 2013	
2 Определение положения цели в бистатических РЛС	март 2014	
3 Экспериментальное исследование мощности распространения сигнала в бистатических РЛС	июнь 2014	
4 Моделирование распространения радиосигнала вблизи базовой линии БРЛС	октябрь 2014	
5 Техническая реализация. Описание изобретения	январь 2015	

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ (Байкенов А.С.)  
(подпись) (Ф.И.О)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ (Рутгайзер О.З.)  
(подпись) (Ф.И.О)

Задание принял к исполнению магистрант \_\_\_\_\_ (Кузубаев Р.Г.)  
(подпись) (Ф.И.О)

## **Аңдатпа**

Осы жұмыста радиолокация, сондай-ақ бистатикалық РЛС мәселелерінің жағдайы қарастырылады. Базалық желі қасында объектінің орналасуының БРЛС қабылдағышының қабылдайтын сигнал қуатына ықпал етуі жайында тәжірибелік зерттеу жүргізілді. Бистатикалық РЛС элементтерінен тұратын радиолокациялық жүйенің көп позициялық математикалық моделінің нұсқасы құрастырылып зерттелді. Бистатикалық РЛС базалық желісінің қасында орналасқан объектінің орнын анықтайтын жүйе құрылды.

## **Аннотация**

В работе рассматривается состояние проблем радиолокации, в частности бистатической РЛС. Проведено экспериментальное исследование влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала приемника в БРЛС. Разработан и исследован вариант многопозиционной математической модели радиолокационной системы, состоящей из элементов бистатических РЛС. Разработан способ и система определения местоположения объекта вблизи базовой линии бистатической РЛС.

## **Abstract**

This dissertation deals with the state of radiolocation problems, in particular it represents bistatic radar problems. Was conducted an experimental study about the object's location near the base line of bistatic radar and its impact on the signal's power. The option was developed and studied for multipositional mathematic model of radiolocation system, that comprises elements of bistatic radar. A method and system were developed for determining the object's location near the base line of bistatic radar.

## Содержание

Введение.....	7
1 Состояние проблем радиолокации .....	8
1.1 Общие сведения о радиолокации .....	8
1.1.1 Виды зондирующих излучений .....	9
1.1.1.1 РЛС с непрерывным зондирующим излучением.....	9
1.1.1.2 РЛС с импульсным зондирующим излучением.....	9
1.1.1.3 Сравнение РЛС с непрерывным и импульсным излучением .....	10
1.1.2 Диапазоны волн, применяемых в радиолокации .....	11
1.1.3 Методы измерения координат и параметров движения целей.....	12
1.1.3.1 Амплитудный метод радиолокационных измерений.....	13
1.1.3.2 Частотный метод радиолокационных измерений.....	15
1.1.3.3 Фазовый метод радиолокационных измерений .....	17
1.1.3.4 Измерения, основанные на эффекте Доплера .....	17
1.2 Принцип организации радиолокационной станции .....	18
1.2.1 Активная радиолокация.....	18
1.2.2 Радиолокация с активным ответом .....	19
1.2.3 Пассивная радиолокация .....	20
1.3 Характеристики целей в радиолокации .....	20
1.3.1 Эффективная площадь рассеяния.....	21
1.3.2 Технология снижения заметности.....	22
1.4 Бистатическая радиолокация .....	22
1.4.1 Преимущества бистатической радиолокации .....	22
1.4.2 Принцип организации бистатической радиолокации .....	23
1.4.3 Актуальные вопросы бистатической радиолокации .....	24
1.5 Выводы .....	25
2 Определение положения цели в бистатических РЛС.....	26
2.1 Схема просветной бистатической РЛС.....	26
2.2 Угломерно-дальномерный метод .....	27
2.3 Расчет координат неманеврирующей цели .....	29
2.4 Расчет координат маневрирующей цели .....	33
2.5 Влияние высоты полета цели.....	35
2.6 Двухчастотный фазовый метод измерения суммарной дальности.....	36
2.7 Анализ потока мощности сигнала в БРЛС .....	38
2.8 Выводы .....	41
3 Экспериментальное исследование мощности распространения сигнала в БРЛС .....	42
3.1 Исследование влияния местности на мощность сигнала приемника .....	42
3.2 Исследование влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала на футбольном поле.....	48
3.2.1 Анализ мощности сигнала при пересечении объектом БЛ .....	53
3.3 Выводы.....	55

4 Моделирование распространения радиосигнала вблизи базовой линии БРЛС .....	56
4.1 Моделирование зоны обнаружения БРЛС.....	56
4.1.1 Вывод.....	57
4.2 Моделирование многопозиционной РЛС .....	58
4.2.1 Разработка элементов РЛС.....	58
4.2.2 Принцип работы системы .....	60
4.2.2.1 Объект движется без остановки .....	60
4.2.2.2 Объект движется с остановкой .....	62
4.2.3 Результаты моделирования .....	64
4.3 Выводы .....	67
5 Техническая реализация. Описание изобретения .....	67
5.1 Формула изобретения .....	74
Заключение .....	76
Перечень сокращений .....	77
Список литературы .....	78
Приложение А .....	80

## Введение

В современном мире радиолокационные станции (РЛС) нашли широкое применение для обнаружения воздушных, морских и наземных объектов, а также для определения их дальности, скорости и геометрических параметров. Но с развитием радиолокации, пришли и технологии снижения заметности (англ. *stealth technology*) посредством специально разработанных геометрических форм и радиопоглощающих материалов и покрытий, что резко уменьшает радиус обнаружения объектов [15]. Главной целью при выборе формы является отражение волн в сторону от излучателя — таким образом, часть сигнала поглощается специальными покрытиями, а оставшаяся часть отражается в сторону, не позволяя радиоэхе вернуться к наблюдающей РЛС, что особенно эффективно против совмещённых приёмопередающих станций [15]. Для обнаружения объекта, построенной по технологии снижения заметности, может быть применена многопозиционная РЛС с разнесёнными передающим и приёмным позициями, в частности бистатическая РЛС.

Местоположение цели в бистатических РЛС определяется по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала [26]. Однако, вблизи базовой линии эффект Доплера практически не проявляется, что приводит к ошибкам в определении положения объекта вдоль базовой линии. Также доплеровский эффект не проявляется при неподвижном объекте, что ведёт к невозможности оценить положение неподвижных и малоподвижных целей (например, вертолета).

Для определения необходимых параметров траектории предлагается оценить возможность перехода от частоты биений к гармоническим частотам.

Результаты эксперимента позволят разработать математическую модель, повышения точности определения положения объекта в бистатических РЛС.

# 1 Состояние проблем радиолокации

## 1.1 Общие сведения о радиолокации

Радиолокация – отрасль радиоэлектроники, обеспечивающая получение сведений об объектах путем приема и анализа радиоволн [1,2,3]. В современной литературе близким термином к радиолокации является радионавигация. Однако основной целью радионавигации является определение собственных координат объекта, что в дальнейшем позволяет ориентироваться в пространстве, например, пилот воздушного судна, находясь в нескольких километрах над землей, определяет свои координаты благодаря радионавигации. Термин «радиолокация» произошел от латинских слов «locus» - место и «radio» - излучение, характеризующих решение важнейшей задачи.

В сфере радиолокации, объекты, информацию о которых необходимо получать, принято называть радиолокационными целями либо просто целями. Цели различаются на: аэродинамические (самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты, различные ракеты и т.д.), наземные и надводные (автомобили, бронетранспортеры, корабли), природного происхождения (естественные ориентиры на местности, тучи, астероиды, планеты и т.д.) и другие.

Совокупность сведений об объектах (радиолокационных целях), извлекаемую в результате приема и анализа радиоволн называют радиолокационной информацией [2, 3]. Данные сведения могут касаться наличия или отсутствия объектов (целей) в определенных контролируемых областях пространства, их координат, численности и других параметров движения, а также характеристик объектов.

Основным техническим средством радиолокации, позволяющее получать радиолокационную информацию является радиолокационная станция (РЛС). Для увеличения контролируемой области пространства, расширения информационных возможностей радиолокационные станции объединяют в радиолокационные системы [1,2,3].

Радиолокационная станция представляет собой передатчик, где генерируется сигнал определенной частоты и приемник, который принимает отраженный от объекта (цели) сигнал. Для излучения в пространство электромагнитного поля и его приема после отражения используются передающая и приемная антенны соответственно.

Таким образом, радиолокационная станция или радар (англ. radar от radio detection and ranging — радиообнаружение и дальнометрия) — система, которая позволяет обнаруживать различные объекты (воздушные, морские, наземные и др.), а также определять их дальность, высоту, азимут, скорость движения, геометрические параметры и т.д. В РЛС использует метод, основанный на излучении радиоволн и регистрации их отражений от объектов.



## 1.1.1 Виды зондирующих излучений

Традиционно в радиолокации применяются непрерывные гармонические (рис. 1.1, а) или узкополосные импульсные сигналы (рис. 1.1, б) [3, 4]. Стремление получить большее количество информации о зондируемых объектах привело к использованию в радиолокационных системах сверхширокополосных (СШП) радиолокационных сигналов [4].

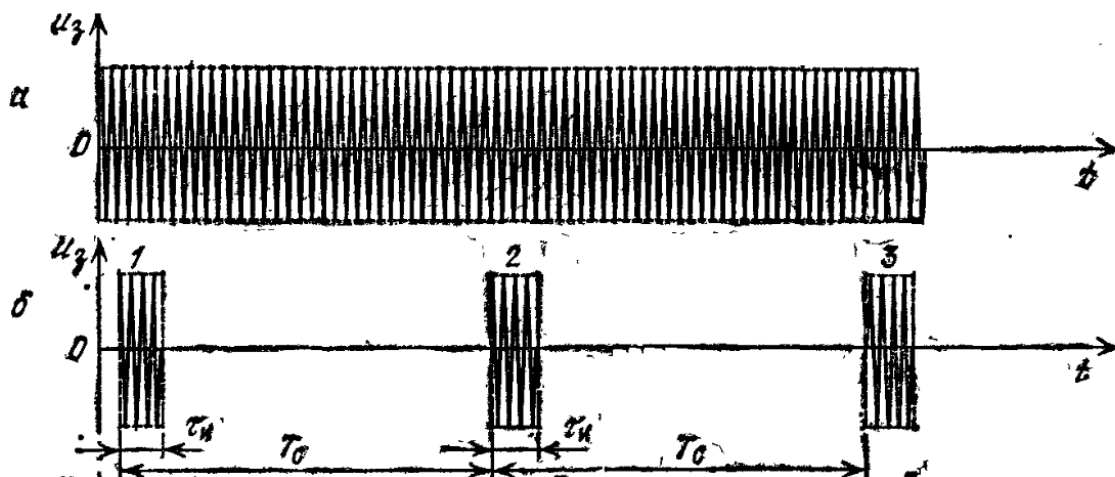


Рисунок 1.1 – Временные диаграммы зондирующего излучения

### 1.1.1.1 РЛС с непрерывным зондирующим излучением

РЛС с непрерывным зондирующим излучением используются в основном для определения радиальной скорости движущегося объекта [5] (использует эффект Доплера). Достоинством РЛС такого типа является дешевизна и простота использования, однако в таких РЛС сильно затруднено измерение расстояния до объекта [5].

Пример: простейший радар для определения скорости автомобиля.

### 1.1.1.2 РЛС с импульсным зондирующим излучением

Импульсное излучение может быть импульсным большой скважности – порядка сотен - тысяч и импульсным малой скважности – порядка единиц – десятков [3]. Под скважностью импульсов понимают отношение периода следования к длительности импульса.

Периодическую последовательность импульсов малой скважности называют также квазинепрерывным сигналом, т.к. имеющийся в нем интервал между импульсами относительно невелик. Излучение считается когерентным, если начальные фазы всех импульсов одинаковые или закономерно изменяются от импульса к импульсу. Если это условие не соблюдается, то излучение некогерентное.

В основе импульсной радиолокации лежит принцип измерения временной задержки между излученным и принятым импульсом [6].

Обычно радиолокаторы направляют на свои цели радиочастотный (РЧ) импульс, а затем «слушают» отраженный эхо-сигнал. Поскольку РЧ-импульс распространяется со скоростью света, время, необходимое для возврата эхо-сигнала, пропорционально расстоянию до цели. Это, конечно, относится к активному радиолокатору, который воспринимает отраженную целью энергию. Интервал следования импульсов – это важный параметр, потому что он ограничивает максимальный диапазон однозначного измерения дальности или расстояние, на котором может работать радиолокатор [7]. Время отсутствия импульса, фактически может быть лучшим показателем максимального рабочего расстояния системы радиолокатора. В большинстве радиолокационных систем применяются переключатели передача/прием, чтобы использовать одну и ту же антенну для передатчика и приемника. Передатчик и приемник подключаются к антенне попеременно. Передатчик посылает импульсы, а приемник «слушает» отраженный эхо-сигнал в течение интервала между импульсами. Пауза между импульсами – это период времени, в течение которого приемник может прослушивать отраженные эхо-сигналы.

Точность измерения расстояния до объекта определяется двумя параметрами [6]:

- длительностью импульса, которой также определяется разрешение радара;

- точностью измерения времени задержки импульса.

Достоинства импульсного метода измерения дальности:

- возможность построения РЛС с одной антенной;
- простота индикаторного устройства;
- удобство измерения дальности нескольких целей;
- простота излучаемых импульсов, длящихся очень малое время, и принимаемых сигналов.

Недостатки:

- необходимость использования больших импульсных мощностей передатчика;

- невозможность измерения малых дальностей;

- большая мёртвая зона.

### **1.1.1.3 Сравнение РЛС с непрерывным и импульсным излучением**

В импульсных РЛС наиболее просто решается задача разделения передающего и приемного каналов и использования общей антенны для передачи и приема. В РЛС с непрерывным излучением прямой сигнал, просачиваясь в приемный канал, перегружает приемник и маскирует слабые сигналы целей. Особенно важно ослабить связь передающего и приемного каналов в доплеровских РЛС, где низкочастотные помехи от вибраций и шумов кристаллических смесителей находятся в диапазоне доплеровских

частот. В таких случаях обычно применяют разнесенные друг от друга передающую и приемную антенны.

В РЛС с непрерывным излучением опасность пробоя антенно-фидерной системы меньше, чем в импульсных РЛС благодаря меньшей пиковой мощности.

Радиолокаторы непрерывного излучения с ЧМ имеют преимущество, перед импульсными РЛС, состоящее в меньших размерах ближней непросматриваемой зоны, а доплеровские РЛС с непрерывным излучением этой зоны вовсе не имеют.

Из доплеровских систем наименее пригодны для дальнометрии РЛС с непрерывным излучением. Когерентно-импульсные системы совмещают измерения скорости и дальности целей, в них просто осуществляется развязка передающего и приемного каналов. Недостатки этих систем: наличие «слепых» скоростей и неоднозначность измерения скорости.

РЛС с частотной модуляцией просто и с большой точностью измеряют малые дальности (высоты) одной цели, но они уступают импульсным системам многоцелевой радиолокации, которые требуют сложный многоканальный спектроанализатор и трудно осуществимую линейную частотную модуляцию.

В импульсных РЛС с внутриимпульсной модуляцией наиболее успешно решается проблема совмещения большой дальности действия с большой точностью и высокой разрешающей способностью по дальности, а также с точным и однозначным измерением скорости.

### **1.1.2 Диапазоны волн, применяемых в радиолокации**

Радиолокация осуществляется преимущественно с помощью сигналов очень высокой частоты по следующим причинам [3]: 1) острая направленность волн, необходимая для точной пеленгации и большой дальности действия РЛС, может быть получена только при условии, что длина волны  $\lambda$  значительно меньше линейных размеров антенны, а это, как правило, выполняется при  $\lambda < 10$  м; 2) такой выбор длины волны вызывается условиями вторичного излучения.

Различают три вида вторичного излучения [3]: зеркальное отражение, диффузное рассеяние и резонансное переизлучение.

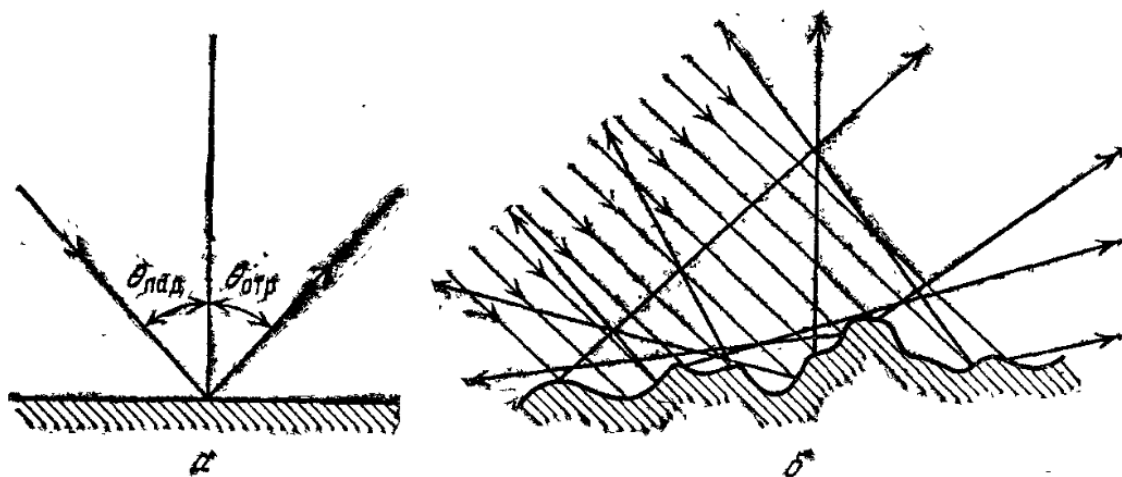


Рисунок 1.2 – Зеркальное (а) и диффузное (б) отражение радиоволн

Зеркальное отражение (рис. 1.2, а) происходит при облучении целей, имеющих зеркальную поверхность или шероховатости, размером менее  $\lambda/16$ . Так как углы падения  $\theta_{\text{пад}}$  и отражения  $\theta_{\text{отр}}$  равны, то зеркально отраженные волны не улавливаются антенной РЛС и сигнала не образуют (исключение составляют волны, падающие под прямым углом к плоскости цели).

Диффузное рассеяние (рис. 1.2, б) имеет место при более шероховатой или многогранной отражающей поверхности, причем интенсивность диффузно рассеянных волн возрастает с уменьшением  $\lambda$ .

Вторичные волны становятся еще более интенсивными в случае резонансного переизлучения, когда линейные размеры цели равны или кратны полуволне. Если же длина волны значительно больше размеров отражающей поверхности, то волны огибают эту поверхность (дифракция) и почти не улавливаются приемной антенной РЛС [1,3].

Требования радиолокации способствовали развитию техники сверхвысоких частот. В радиолокации последовательно внедрялись все более короткие радиоволны: метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые и даже лазерная локация (оптический диапазон волн) [3]. Вместе с тем возникла необходимость в радиолокации на низких радиочастотах, которая возможна при больших размерах антенн и целей.

### 1.1.3 Методы измерения координат и параметров движения целей

Основные методы измерения – это амплитудный, частотный, фазовый, доплеровский и другие методы, в зависимости от того, какой параметр сигнала служит основой для измерений координат и параметров движения целей [3].

### 1.1.3.1 Амплитудный метод радиолокационных измерений

Импульсный метод радиодальнометрии с излучением простых радиоимпульсов – это один из амплитудных методов радиолокационных измерений: для его реализации незатухающие колебания несущей частоты подвергаются в передатчике амплитудно-импульсной модуляции [3].

Для понимания сущности метода, рассмотрим простую функциональную схему РЛС (дальномера), представленную на рисунке 1.3.

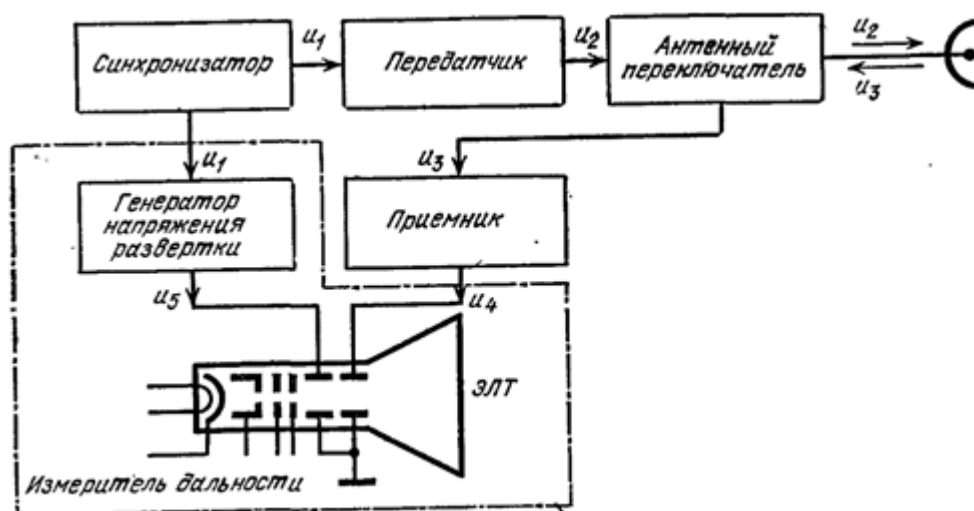


Рисунок 1.3 – Функциональная схема импульсного РЛС

Синхронизатор РЛС создает импульсы  $u_1$  со строго стабильным периодом следования  $T_c$ , представленные на временной диаграмме на рисунке 1.4. Этими импульсами одновременно запускаются передатчик и генератор развертки, напряжение которого  $u_5$  подается на горизонтально отклоняющиеся пластины электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Радиоимпульсы передатчика  $u_2$  имеют длительность  $\tau_n$  и ту же частоту следования  $F_c=1/T_c$ , что и синхронизирующие импульсы  $u_1$ . Антенный переключатель направляют зондирующие импульсы в антенну и закрывают вход приемника на время передачи. После отражения от цели образуются радиолокационные импульсы  $u_3$ , которые принимаются той же антенной. Вследствие несовершенства антенного переключателя на вход приемника проникает малая доля высокочастотной энергии передатчика, которая служит опорным сигналом для отсчета дальности. Все эти радиоимпульсы усиливаются и детектируются в приемнике, в результате чего получают видеоимпульсы  $u_4$ . Приложенные к вертикально отклоняющим пластинам ЭЛТ, они вызывают вертикальное отклонение светового пятна на экране трубки. Место отклонения зависит от напряжения развертки  $u_5$  в данный момент времени  $t$ .

Напряжение  $u_5$  пилообразное, оно нарастает с постоянной скоростью  $V_p$  во время прямого хода развертки и быстро уменьшается до исходной величины во время обратного хода развертки  $T_{ох}$ ; далее следует интервал



покоя  $T_{п}$  вплоть до начала очередного цикла развертки. В связи с запаздыванием на время  $t_{д}$  отраженного сигнала отметка его смещена от начала развертки на расстояние

$$l = V_p t_{д} = V_p 2D/c, \quad (1.1)$$

что соответствует масштабу

$$m_{д} = 1/D = 2V_p/c \quad (1.2)$$

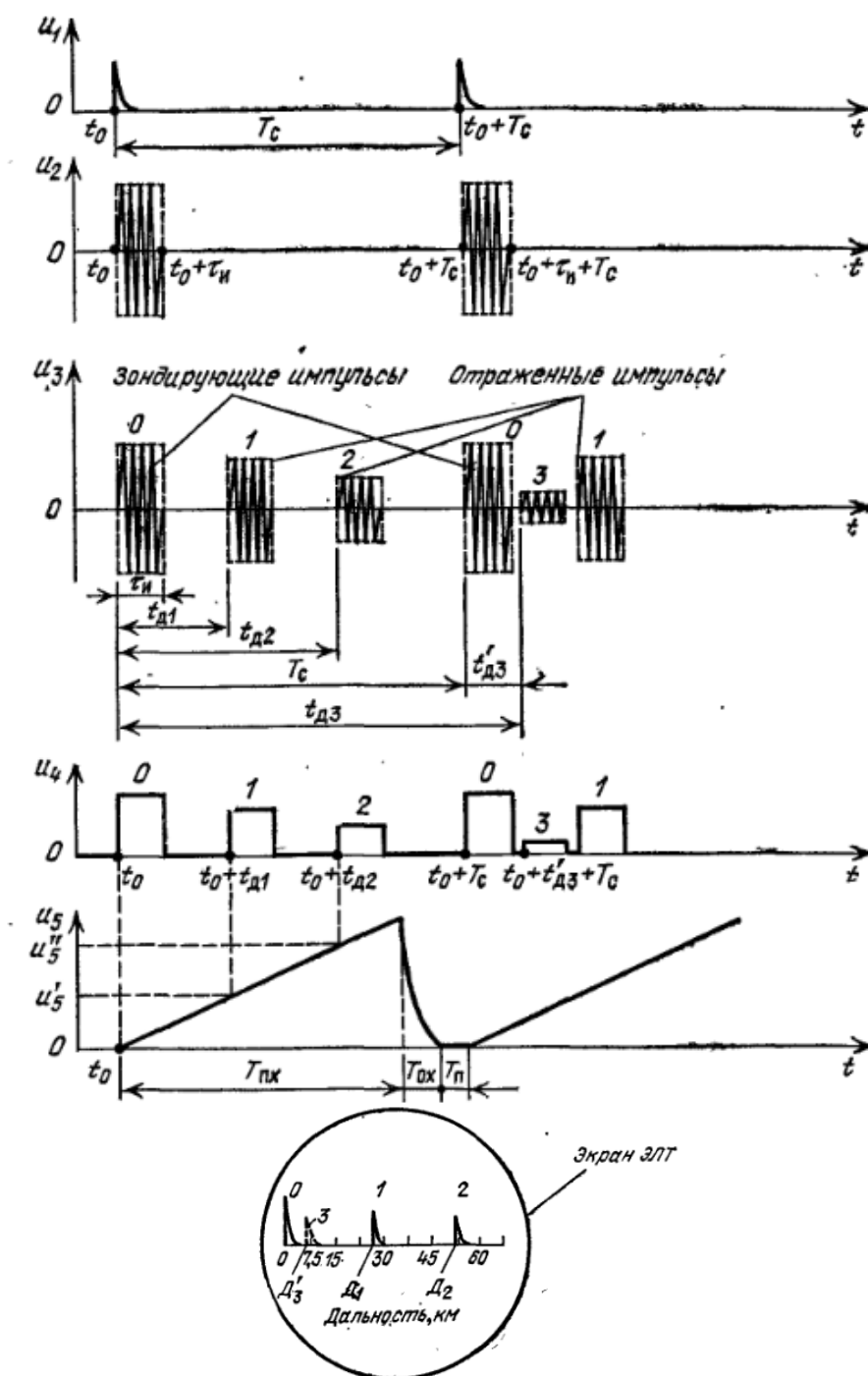


Рисунок 1.4 – Временные диаграммы напряжений в импульсном РЛС

Градуировка шкалы дальности индикатора производится согласно этому масштабу. Например, как показано на рисунке 1.4 цели 1 соответствуют напряжению развертки  $u_5 = u_5'$  и дальность  $D_1 = 25,5$  км.

Необходимо подметить, что потенциальная точность измерения дальности, как и разрешающая способность РЛС по дальности, тем выше, чем больше отношение сигнал/шум и меньше длительность сигнала (шире его спектр) [3].

Простые радиоимпульсы не позволяют совместить большую дальность действия РЛС с высокой разрешающей способностью и точностью по дальности, так как первое требует больших, а второе требует малых по длительности импульсов [1,3]. Противоречие разрешается использованием сложных радиоимпульсов — зондирующих импульсов большой длительности  $\tau_{\text{и}}$  с внутренней частотной или фазовой модуляцией [3]. Внутриимпульсная модуляция расширяет спектр излучения от  $\Delta f_{\text{сп}} = 1/\tau_{\text{и}}$  до  $\Delta f'_{\text{сп}}$ , а оптимальный фильтр приемника разрушает внутриимпульсную модуляцию, сохраняя ширину спектра, и тем самым уменьшает длительность импульсов от  $\tau_{\text{и}}$  до  $\tau'_{\text{и}} = 1/\Delta f'_{\text{сп}}$ .

Длительность зондирующих импульсов  $\tau_{\text{и}}$  выбирается достаточно большой, чтобы энергия излучения обеспечила заданную дальность действия РЛС, а внутриимпульсная модуляция расширила спектр настолько, чтобы сжатые импульсы удовлетворяли требованиям по разрешению и точности измерения дальности.

### 1.1.3.2 Частотный метод радиолокационных измерений

Для этого метода характерно, что зондирующее излучение непрерывное и модулировано по частоте. Модуляция позволяет различать прямой и отраженный сигналы по разности их частот и тем самым не только обнаружить цель, но и измерить ее дальность [1,3].

Частоту передатчика  $f_{\text{прд}}$ , естественно, нельзя неограниченно увеличивать или уменьшать. Ее изменяют по пилообразному (рис. 1.5, а) или синусоидальному (рис. 1.5, б) закону с частотой модуляции  $F_{\text{м}} = 1/T_{\text{м}}$ . Девиацию, т.е. максимальное отклонение частоты, обозначим  $\Delta f_{\text{м}} = f_{\text{макс}} - f_{\text{мин}}$ .

Частота отраженного сигнала  $f_{\text{отр}}$  повторяет частоту излученного сигнала  $f_{\text{прд}}$  с запаздыванием  $t_{\text{д}} = 2 D/c$ . Отсюда в один и тот же момент времени  $t$  разность частот прямого ( $f_{\text{прд}}$ ) и отраженного ( $f_{\text{отр}}$ ) сигналов, т.е. частот биений.

$$F_{\text{б}} = |V_{\text{м}}| t_{\text{д}} = 2 |V_{\text{м}}| D/c, \quad (1.3)$$

где  $|V_{\text{м}}|$  - скорость изменения частоты.

В один полупериод модуляции  $T_{\text{м}}/2$  частота передатчика ( $f_{\text{прд}}$ ) возрастает и скорость  $V_{\text{м}} > 0$ , а в другой полупериод – наоборот; вместе с тем

частота  $F_D$  физически не может быть отрицательной величиной. Поэтому в формулу (1.3) введено абсолютное значение скорости модуляции  $|V_M|$ . При пилообразном законе эта скорость постоянная и равна частному от деления девиации частоты  $\Delta f_m$  на ее продолжительность  $T_M/2$ . Тогда формулу (1.3) можно представить в виде

$$F_D = 2|V_M|D/c = 4\Delta f_m D/c T_M = 4\Delta F_M D/c, \quad (1.4)$$

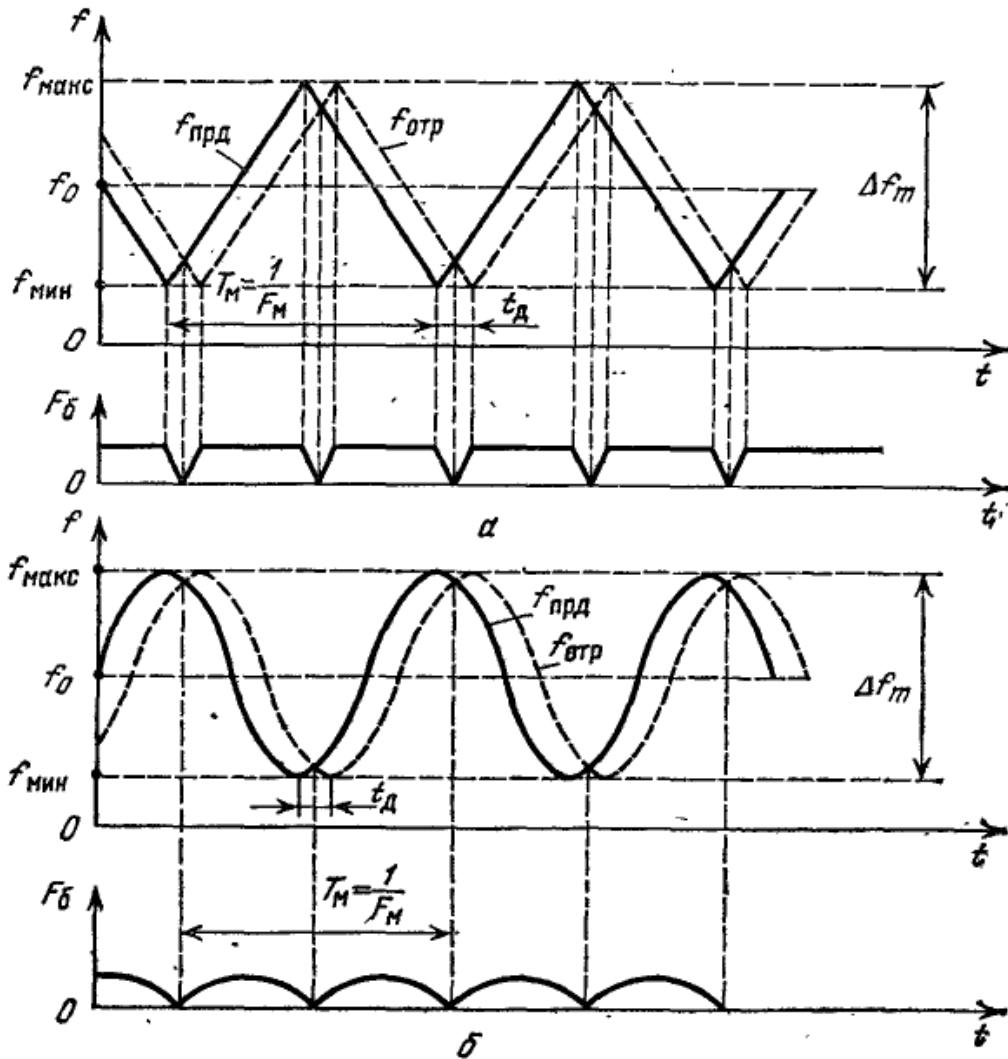


Рисунок 1.5 – Временные диаграммы, иллюстрирующие частотный метод РЛС

Величины  $\Delta f_m$ ,  $F_m$  и  $c$  – постоянные, а это значит, что в ЧМ РЛС измерение текущей дальности цели  $D$  сводится к измерению разности частот  $F_D$  прямого и отраженного сигналов, причем  $D$  и  $F_D$  связаны между собой прямо пропорциональной зависимостью. Отсюда происходит другое название величины  $F_D$  – частота дальности.

Линейный закон изменения частоты  $F_D$  нарушается на участках протяженностью  $t_d$ , в середине которых эта разностная частота проходит

через нулевое значение. Однако, если максимальное запаздывание сигнала, которое фиксируется данной РЛС, значительно меньше периода модуляции ( $t_{\text{дмакс}} \ll T_M$ ), то нарушением линейности можно пренебречь и считать формулу (1.4) справедливой для любого закона частной модуляции. Соотношение  $t_{\text{дмакс}} \ll T_M$  является также условием однозначного отсчета дальности.

### 1.1.3.3 Фазовый метод радиолокационных измерений

Измерение дальности фазовыми методами заключается в измерении приращения фазы гармонического колебания масштабной частоты за время запаздывания отраженного сигнала:

$$\Delta\phi = \Omega_M t_d = 2\pi F_M \bullet 2D/c = 4\pi D/\lambda_M. \quad (1.5)$$

Частота  $F_M$  и длина волны  $\lambda_M = c/F_M$  называются масштабными потому, что от них зависит масштаб шкалы дальности, т.е. коэффициент пропорциональности между измеряемым фазовым сдвигом  $\Delta\phi$  и дальностью цели  $D$ .

Через фазовые интервалы  $\Delta\phi = 2\pi$  гармоническое колебание, а с ним и показания фазометра повторяются. Отсюда согласно формуле (1.5) максимальный предел однозначно измеряемой дальности

$$D_{\text{одн}} = \lambda_M/2. \quad (1.6)$$

Наиболее простым по устройству был бы фазовый РЛС с излучением колебаний только одной – несущей частоты  $f_0$ . Но тогда масштабная частота  $F_M = f_0$  и длина волны  $\lambda_M = \lambda_0 = c/f_0$ , а так как РЛС обычно работает на УКВ, то это ограничило бы однозначно измеряемую дальность несколькими метрами ( $D_{\text{одн}} = \lambda_M/2$ ).

Вместе с тем масштабная частота влияет на точность определения дальности. Всем фазовым РЛС присуще противоречие: увеличение масштабной частоты способствует повышению точности измерений, но уменьшает предел однозначно измеряемой дальности [3].

### 1.1.3.4 Измерения, основанные на эффекте Доплера

Радиальную и угловую скорости цели можно найти вычислением скорости приращения дальности и углов во времени. Обычно предпочитают более простую и точную операцию — непосредственное измерение так называемого доплеровского сдвига частоты, вызванного движением цели [3]. Если цель приближается к РЛС или удаляется от нее, то отраженный сигнал появляется в РЛС соответственно раньше или позже, чем при неподвижной цели. За счет этого фаза принимаемой волны имеет другие значения, а это

равнозначно приращению частоты радиосигнала. Измерив полученное (доплеровское) приращение частоты, можно (опять же благодаря постоянству скорости распространения радиоволн) определить радиальную скорость цели.

Подобно тому, как разность времени запаздывания сигнала в элементах антенны определяется угловыми координатами цели, разность доплеровских сдвигов частот в тех же (обычно крайних) элементах антенны определяется скоростью изменения углового положения цели.

Вывод: физической основой, радиолокационных измерений дальности, угловых координат, радиальной и угловой скоростей цели является постоянство направления и скорости распространения электромагнитных волн в однородной среде. Добавим, что для радиолокационных измерений требуются еще опорные сигналы, задаваемые прямой излучаемой волной. Опорные сигналы несут информацию о зондирующем излучении — его несущей частоте, фазе, времени появления, об исходном направлении луча антенны и др.

## **1.2 Принцип организации радиолокационной станции**

Как отмечалось ранее, радиолокационная станция представляет собой передающее и приемное устройства. Передающее устройство излучает в пространство электромагнитную волну, которая отражаясь от цели, поступает на приемную сторону РЛС, при появлении (нахождении) цели в контролируемой зоне. Таким образом, носителем информации об объекте является принятый радиолокационный сигнал.

Современная радиолокация осуществляет прием радиолокационного сигнала не только в результате вторичного излучения или переизлучения, но и собственного излучения радиоволн. Поэтому различают радиолокацию на: активную, с активным ответом и пассивную [1,3].

### **1.2.1 Активная радиолокация**

Активная радиолокация основывается на методе отражения (вторичного излучения) радиоволн от цели (рис. 1.6). Если быть точнее, то она представляет собой активное излучение сигнала в пространство и пассивный прием отраженного от цели сигнала.



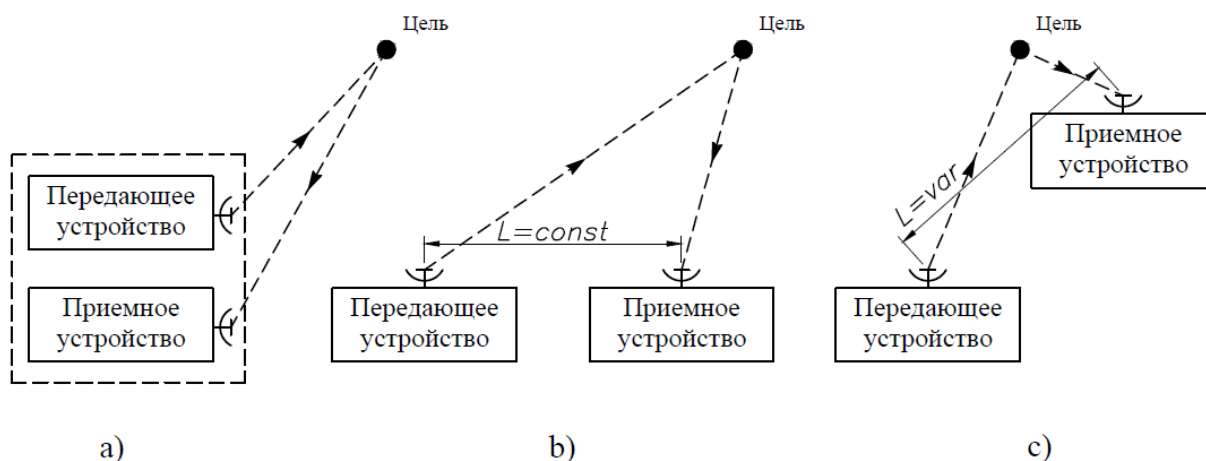


Рисунок 1.6 – Принцип работы активной радиолокации

Активная радиолокация классифицируется в зависимости от расположения передающего и приемного оборудований относительно друг друга. При пространственно совмещенном использовании передатчика и приемника (представляют собой одно устройство) активная радиолокация называется совмещенной, однопозиционной или моностатической (от англ. monostatic radar) [1,3,8] (рис. 1.6,а). Моностатическая радиолокация в основном состоит из одной антенны, которая используется поочередно на передачу и прием радиоволны.

При разнесении передатчика и приемника в пространстве активная радиолокация называется двухпозиционной или бистатической (от англ. bistatic radar) [1,3,8,9,10] (рис. 1.6, b). Бистатическая радиолокация состоит из одного передающего устройства и одного приемного, разнесенные в пространстве, в основном, прямой видимости на фиксированное расстояние  $L$  называемой базой. При большем количестве устройств радиолокационная станция называется многопозиционной. Помимо фиксированной базовой линии, также большое применение нашла радиолокация и с переменной базой (рис. 1.6, c). Переменная база позволяет направлять (координировать) самонаводящуюся ракету, в головку которой установлен приемник.

Ввиду усложнения задач для радиолокации, в настоящее время все большую популярность приобретают радиолокационные установки с разнесенным передающим и приемным устройствами [1,9,10,11].

### 1.2.2 Радиолокация с активным ответом

Радиолокация с активным ответом представляет собой активное излучение радиоволны в пространство и также получение активного ответа на приемной части (рис. 1.7). Данная радиолокация активно применяется для опознавания, например «свой-чужой». Также нашла широкое применение в радионавигации.

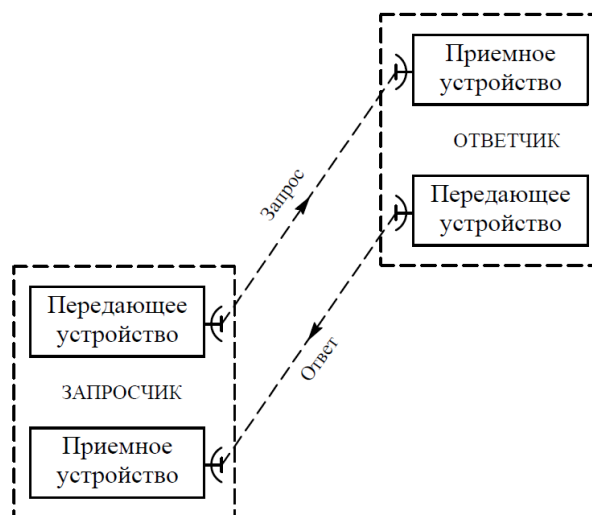


Рисунок 1.7 – Принцип работы радиолокации с активным ответом

### 1.2.3 Пассивная радиолокация

Пассивная радиолокация представляет приемное устройство, принимающий сигнал, излученный самой целью (рис. 1.8). В качестве подобных сигналов могут выступать: нагретые части цели, шум (при работе винтов подводных лодок), радиоволны, используемые целью для радиосвязи, радионавигации и т.д. Пассивная радиолокация применяется, например в радиоразведке.

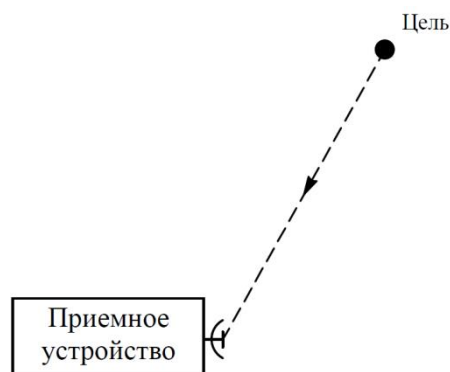


Рисунок 1.8 – Принцип работы пассивной радиолокации

Также необходимо отметить, что активную и пассивную радиолокации объединяют в целые системы, позволяющие повысить работу РЛС по определению координат и характеристик цели.

### 1.3 Характеристики целей в радиолокации

Объектом радиолокационного наблюдения, или целью может быть любое тело или группа тел с электрическими или магнитными свойствами, отличными от свойств среды, в которой распространяются радиоволны, в

результате чего, энергия электромагнитных волн, падающих на цель, рассеивается во всех направлениях, в том числе и в направлении РЛС.

Обнаружение объекта представляется возможным только при фиксации РЛС сигналов, поступающих на вход приемного оборудования. Именно наличие данного сигнала говорит о существовании цели, если же сигнал отсутствует или не поступает по каким-то причинам, то следует полагать, что и цели тоже нет. Именно поэтому для борьбы с РЛС большое внимание уделяется самим объектам, а именно их характеристикам, особо важным из которых является эффективная площадь рассеяния.

Также необходимо отметить, что определение координат целей основано на использовании следующих физических свойств радиоволн:

- скорость распространения радиоволн в свободном пространстве имеет конечное приблизительно постоянное значение ( $3 \cdot 10^8$  м/с);

- траектории распространения радиоволн можно считать прямыми линиями;

- частота принимаемых электромагнитных колебаний отличается от частоты излучённых колебаний в том случае, если цель перемещается относительно РЛС (эффект Доплера).

### **1.3.1 Эффективная площадь рассеяния**

Важнейшей характеристикой целей является эффективная площадь рассеяния (ЭПР, англ. Radar Cross-Section, RCS). По определению [1,3,9] ЭПР цели равна площади поверхности условного объекта, рассеивающего изотропно всю падающую на него энергию и создающего в удаленной точке приема ту же плотность потока мощности, что и реальная цель.

Данное определение справедливо как для однопозиционной РЛС так и для многопозиционной, в частности бистатической РЛС. Однако у большинства реальных объектов ЭПР зависит от направлений облучения и приема, т.е. от его ориентации (ракурса) по отношению к антеннам передающей и приемной позиций РЛС, поэтому однопозиционная ЭПР отличается от бистатической, причем ЭПР целей в БРЛС больше, чем в однопозиционной [9,12,13].

Также ЭПР объекта зависит от его формы, размеров, материала, из которого он изготовлен и от длины волны зондирующего радиосигнала. Поскольку ЭПР — формально введенный параметр, то ее значение не совпадает ни со значением полной площади поверхности объекта, ни со значением площади его поперечного сечения (англ. Cross-Section).

ЭПР элементарных объектов вычисляют из простых соотношений, а сложных целей (самолеты, корабли) определяют в основном экспериментальным путем [9,12].

Таким образом, уменьшение ЭПР повышает выживаемость летательных аппаратов (ЛА), поэтому при проектировании боевых ЛА принимаются меры для снижения значений их ЭПР.

### **1.3.2 Технология снижения заметности**

Технология снижения заметности для радара (англ. stealth technology) — комплекс методов снижения заметности боевых машин в радиолокационном, инфракрасном и других областях спектра обнаружения посредством специально разработанных геометрических форм и радиопоглощающих материалов и покрытий, что резко уменьшает радиус обнаружения и тем самым повышает выживаемость боевой машины [14,15]. Создание малозаметных объектов является следствием научно-технического прорыва в дорогостоящих, наукоемких и высокоэффективных технологиях и относится к прерогативе исключительно экономически высокоразвитых государств, доктрины которых предполагают гарантированное военно-техническое превосходство над другими странами.

Следует заметить, что размеры отражающих поверхностей объекта должны быть значительно больше длины волны радиолокационного сигнала, так как только в этом случае сигнал отражается от поверхности по законам геометрической оптики, именно поэтому значительного поглощения радиоволн можно добиться только в сантиметровом диапазоне, и гораздо хуже в дециметровом [14].

С точки зрения РЛС обнаружения, малозаметные объекты имеют следующие характерные особенности [14]:

- существенно снижен уровень отраженного радиолокационного сигнала в направлении приемной антенны за счет радиопоглощения и переотражения в других направлениях, в результате чего уменьшено отношение полезного сигнала к шуму;

- переотражение радиолокационного сигнала от плоских поверхностей относительно больших размеров происходит с формированием узкой диаграммы направленности и наличием боковых лепестков.

Однако применение многопозиционной радиолокации позволяет бороться с переотражением зондирующего сигнала в другом направлении малозаметными объектами [9,13,14,15]. Напомним, что частным случаем многопозиционной радиолокации является двухпозиционная (разнесенная) система активной локации с одним передатчиком (бистатическая система).

## **1.4 Бистатическая радиолокация**

### **1.4.1 Преимущества бистатической радиолокации**

Бистатическая радиолокация (БРЛС), как отмечалось ранее, это разнесенные в пространстве прямой видимости передающее и приемное устройства. Такое построение имеет ряд преимуществ по сравнению с моностатическим радиолокатором [16].

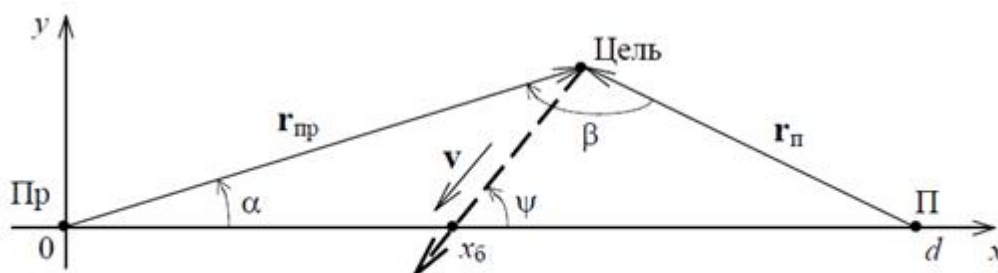
Известны многопозиционные, в частности, бистатические радиолокационные станции (РЛС), реализующие метод радиолокации "на

просвет", основанный на просветном эффекте [9, 16]. Суть эффекта заключается в том, что при облучении объекта, размеры которого в несколько раз больше длины волны, излучаемой передатчиком, энергия, рассеянная назад, на несколько порядков (в среднем на три) меньше энергии, рассеянной вперед по линии облучения. Таким образом, эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта при наблюдении в бистатическом радиолокаторе "на просвет" в тысячи раз превосходит ЭПР объекта для традиционного моностатического радиолокатора, что является одним из важнейших преимуществ "просветных" РЛС.

Другим важнейшим преимуществом "просветных" РЛС является независимость ЭПР переднего рассеяния от материала, из которого изготовлен объект, и, в частности, от наличия на нем Стелс-покрытия [16]. Поэтому в зоне существования просветного эффекта бистатическая РЛС имеет более высокие характеристики обнаружения малозаметных объектов (крылатых ракет, самолетов-Stealth, маловысотных самолетов и вертолетов, дельтапланов, шаров и т.д.) [17], чем традиционная моностатическая РЛС.

#### 1.4.2 Принцип организации бистатической радиолокации

В просветных радиолокаторах обнаружение цели осуществляется при её расположении между приемной и передающей антеннами (рис. 1.9). Благодаря такой геометрии системы происходит резкое увеличение бистатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) лоцируемых объектов, практически не зависящее от применения противорадиолокационных покрытий [9, 13, 18, 19].



$r_п$  и  $r_пр$  – дальности от антенн до цели;  $\alpha$  – пеленг цели;  $\beta$  – угол между направлениями от цели на передающую и приемную антенны (бистатический угол);  $v$  – скорость цели

Рисунок 1.9 – Геометрия бистатического радиолокатора

Обнаружение объекта осуществляется путем анализа доплеровских биений частоты эхо-сигналов, возникающих в приемном устройстве при движении воздушных объектов в просветной зоне [9, 16, 19, 20, 21, 22].

Повышенный интерес у исследователей и конструкторов вызывают бистатические просветные радары с монохроматическим излучением [18, 19, 23, 24]. В них рассеянный целью сигнал поступает на вход приемника совместно с мощным прямым сигналом передатчика. Получаемый в точке



приема интерференционный сигнал вследствие движения цели становится модулированным по амплитуде с доплеровской частотой, так что для выделения сигнала доплеровской частоты можно использовать амплитудный детектор. К достоинствам такого приемника следует отнести его простоту и отсутствие специальной привязки по высокой частоте с передатчиком, что особенно важно при большом разнесении приемника и передатчика [18]. Координаты цели определяются по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала [18].

На рисунке 1 изображена схема расположения элементов бистатической системы на плоскости. Приемная антенна (Пр) имеет координаты  $(0, 0)$ , передающая (П) -  $(d, 0)$ . Отрезок между приемной и передающей антеннами называется базой, его длина -  $d$ . Обнаружение цели происходит в окрестности базы, когда имеет место заметный рост ЭПР [18, 19]. Условно зону действия можно ограничить некоторым минимальным значением бистатического угла  $|\beta| = |\beta_{\min}|$ .

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития просветной радиолокации является переход от бистатических к многопозиционным системам, состоящим из нескольких однобазовых РЛС, в которых совместно осуществляется радиолокационное наблюдение целей [18]. Однобазовые РЛС в этом случае удобно называть бистатическими ячейками.

### **1.4.3 Актуальные вопросы бистатической радиолокации**

Как уже отмечалось ранее, бистатическая радиолокация, по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала, позволяет обнаруживать малоразмерные, низколетящие и с применением технологий снижения заметности цели, в чем бесспорное преимущество БРЛС по сравнению с моностатической радиолокацией. Однако вблизи базовой линии эффект Доплера практически не проявляется [9, 16, 18, 22], что приводит к ошибкам в определении положения объекта. Также доплеровский эффект не проявляется при неподвижном объекте, что ведет к невозможности оценить положение неподвижных и малоподвижных целей (например, вертолета).

Таким образом, у бистатической радиолокации, основанной на эффекте Доплера, есть существенный недостаток – наличие нечувствительной зоны вдоль базовой линии [9, 16], а также невозможности оценить положение неподвижных объектов.

Известны работы, направленные на устранение данного нежелательного явления и возможности пеленгации объекта в базовой линии. Например, в [16] для устранения вышеуказанного недостатка в РЛС дополнительно вводится моностатическая РЛС, размещаемая на приемной позиции бистатической "просветной" РЛС и управляемая сигналами с выхода рабочего места

оператора бистатической РЛС. При этом зона обнаружения моностатической РЛС перекрывает зону обнаружения бистатической "просветной" РЛС.

В [25] предлагается определение экстраполированного момента времени пересечения целью линии базы, за счет экстраполяции измеряемых функциональных зависимостей - частоты Доплера от времени и углового направления на цель от времени.

Однако эти и многие другие работы позволяют только повысить вероятность обнаружения целей, а не устраняют данного недостатка полностью.

## **1.5 Выводы**

Анализ состояния проблемы, определения координат объекта показал, что с применением новых технологий снижения заметности, за счет уменьшения эффективной площади рассеяния, возникают большие трудности для традиционных моностатических РЛС.

Новая технология снижения заметности достигается за счет использования радиопоглощающих материалов, формы, размеров объекта.

Однако, эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта при наблюдении в бистатическом радиолокаторе "на просвет" в тысячи раз превосходит ЭПР объекта для моностатического радиолокатора, поэтому БРЛС вызывают большой интерес в современном мире. С использованием бистатической РЛС появились новые параметры измерения для определения координат объекта: частота Доплера, на которую влияет скорость движения объекта, также необходимо учитывать высоту полета, разнесение РЛС и т.д.

Цель и основные задачи.

Целью диссертации является разработка системы определения местоположения объекта вблизи базовой линии бистатической РЛС.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- а) Оценить возможности бистатических РЛС.
- б) Экспериментально исследовать влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала приемника.
- в) Провести исследования с помощью модели распространения радиосигнала вблизи базовой линии.
- г) Разработать способ и систему определения местоположения объекта вблизи базовой линии бистатической РЛС.

## 2 Определение положения цели в бистатических РЛС

В просветных радиолокационных системах (РЛС) используется явление повышения интенсивности рассеянного на цели излучения при ее нахождении между передатчиком и приемником [26, 27]. Просветные РЛС способны успешно обнаруживать воздушные объекты, выполненные с применением технологии Stealth, и маловысотные цели [26].

Просветные радиолокаторы могут быть сформированы из монохроматического передатчика и приемника с амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции радиоволны, рассеянной на цели, и более мощной прямой радиоволны от передатчика [19, 26]. Координаты цели в радиолокаторах находят по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного сигнала [9, 26].

### 2.1 Схема просветной бистатической РЛС

На рисунке 2.1 представлена схема двухкоординатной бистатической РЛС. Элементы системы размещены в плоскости  $xOy$ : приемник (*Receiver*)  $R$  расположен в начале системы координат (в точке  $O$ ), передатчик (*Transmitter*)  $T$  удален от него в направлении оси  $Ox$  на расстояние  $a$ , называемое базой. Цель движется в плоскости  $xOy$  со скоростью  $\vec{v}$ , пересекая линию базы под углом  $\psi$  в точке  $(s,0)$ ,  $0 < s < a$ , в момент времени  $\tau$ ;  $r_T$  – расстояние от передатчика до цели,  $r_R$  – расстояние от цели до приемника. Угол  $\varphi$  характеризует направление прихода рассеянного сигнала:

$$\varphi = \text{arctg}(y/x), \quad (2.1)$$

где  $x, y$  – координаты цели.

Доплеровская частота рассеянного сигнала выражается в виде [26]:

$$f(t) = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения передатчика;

$t$  – время;

$l(t) = r_T(t) + r_R(t)$  – суммарная дальность цели.

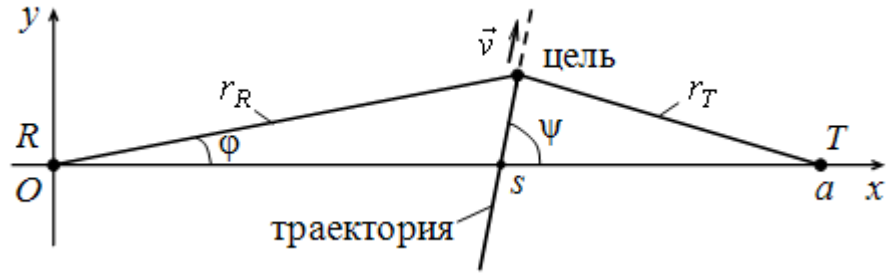


Рисунок 2.1 - Схема просветной бистатической РЛС на плоскости

Зона действия системы представляет собой узкую, вытянутую вдоль оси  $Ox$  область [19, 26], внутри которой можно принять

$$|y| \ll s \text{ и } |y| \ll (a - s) \quad (2.3)$$

## 2.2 Угломерно-дальномерный метод

В бистатических РЛС местоположение цели находят угломерно-дальномерным методом по пересечению луча, исходящего из точки  $(0, 0)$  под углом  $\varphi$ , и эллипса с фокусами в пунктах  $(0, 0)$  и  $(a, 0)$  размещения приемника и передатчика и характеризуемого суммарной дальностью  $l$  [26]. Координаты точки пересечения рассчитываются по формулам:

$$x = r_R \cos \varphi = \frac{l^2 - a^2}{2(l - a \cos \varphi)} \cos \varphi, \quad (2.4)$$

$$y = r_R \sin \varphi = \frac{l^2 - a^2}{2(l - a \cos \varphi)} \sin \varphi \quad (2.5)$$

где  $x, y$  – координаты цели;  
 $r_R$  – расстояние от цели до приемника;  
 $\varphi$  – угол, характеризующий направление прихода рассеянного сигнала;

$l$  – суммарная дальность;  
 $a$  – база бистатической РЛС.

Поскольку, в просветной РЛС определение координат производится в непосредственной близости от линии базы (2.3), то для расстояний  $r_T, r_R, l$  и угла  $\varphi$  удобно иметь приближенные представления:

$$r_T = \sqrt{(a - x)^2 + y^2} \approx (a - x) + \frac{y^2}{2(a - x)}, \quad (2.6)$$

$$r_R = \sqrt{x^2 + y^2} \approx x + \frac{y^2}{2x}, \quad (2.7)$$

$$l = \sqrt{(a-x)^2 + y^2} + \sqrt{x^2 + y^2} \approx a + \frac{y^2 a}{2x(a-x)}, \quad (2.8)$$

$$\varphi \approx y/x. \quad (2.9)$$

Из (2.8), (2.9) следуют приближенные формулы расчета координат по значениям дальности  $l$  и угла  $\varphi$ :

$$x \approx \frac{2a(l-a)}{\varphi^2 a + 2(l-a)}, \quad (2.10)$$

$$y \approx \frac{2a(l-a)\varphi}{\varphi^2 a + 2(l-a)}. \quad (2.11)$$

В просветной системе с монохроматическим излучением суммарную дальность  $l$  можно найти из (2.2) интегрированием измеренной зависимости  $f(t)$ :

$$l(t) = l(t^*) - \lambda \int_{t^*}^t f(t) dt \quad (2.12)$$

где  $l(t^*)$  – значение дальности в момент  $t^*$  начала интегрирования.

Аналогичный подход – с оценкой дальности по интегрированию доплеровской частоты – в спутниковых системах радионавигации получил название интегрального доплеровского метода [26].

В момент  $t = \tau$  пересечения целью линии базы суммарная дальность принимает минимальное значение  $l(\tau) = a$ , соответственно доплеровская частота переходит нулевой уровень

$$f(\tau) = 0 \quad (2.13)$$

С учетом этого (2.12) принимает вид [26]:

$$l(t) = a - \lambda \int_{\tau}^t f(t) dt \quad (2.14)$$

Момент  $\tau$  в (2.14) определяется по измерениям доплеровской частоты из условия (2.13) или по измерениям угла  $\varphi$  из условия, вытекающего непосредственно из определения угла  $\varphi$  (2.1) и рисунка 2.1.

$$\varphi(\tau) = 0 \quad (2.15)$$

Из (2.14) видно, что предложенный в [21] подход к оценке суммарной дальности формально не позволяет отслеживать траекторию до пересечения целью линии базы [26]. В связи с этим актуальным является поиск приближенных методов оценки местоположения цели для характерных случаев ее движения [26].

### 2.3 Расчет координат неманеврирующей цели

Узость зоны действия и непродолжительное время пребывания цели в ней приводят к широкому использованию в просветных бистатических системах модели движения цели с постоянной скоростью  $\vec{v}$  и углами  $\psi$  близкими к  $90^\circ$  [26]:

$$x(t) = s + v_x(t - \tau) \approx s, \quad (2.16)$$

$$y(t) = v_y(t - \tau), \quad (2.17)$$

где  $v_x = v \cos \psi$ ,  
 $v_y = v \sin \psi$ ,  
 $v = |\vec{v}|$  – величина скорости,  
 $|v_x| \ll |v_y|$ .

В этом случае зависимости (2.1), (2.2) угла и доплеровской частоты от времени с учетом (2.8), (2.9) принимают вид:

$$f(t) \approx -\frac{v_y}{\lambda} \frac{y(t)a}{s(a-s)} = -\frac{v_y^2(t-\tau)a}{\lambda s(a-s)}, \quad (2.18)$$

$$\varphi(t) \approx y(t)/s = v_y(t - \tau)/s. \quad (2.19)$$

Из (2.18), (2.19) следует, что на небольших удалениях цели от линии базы доплеровская частота и угол являются квазилинейными функциями времени со скоростями изменения:

$$\gamma = \frac{df(t)}{dt} \approx -\frac{v_y^2 a}{\lambda s(a-s)}, \quad (2.20)$$

$$\omega = \frac{d\varphi(t)}{dt} \approx \frac{v_y}{s}. \quad (2.21)$$

Решая систему уравнений (2.18), (2.19) относительно координат цели, нетрудно получить для них выражения через измерения доплеровской частоты и угла:

$$x(t) \approx s = \frac{f(t)a\lambda(t-\tau)}{f(t)\lambda(t-\tau) - \varphi^2(t)a}, \quad (2.22)$$

$$y(t) \approx s\varphi(t) = \frac{\varphi(t)f(t)a\lambda(t-\tau)}{f(t)\lambda(t-\tau) - \varphi^2(t)a}, \quad (2.23)$$

или

$$x(t) \approx \frac{a\lambda\gamma}{\lambda\gamma - \omega^2 a}, \quad (2.24)$$

$$y(t) \approx \frac{a\lambda\gamma\omega(t-\tau)}{\lambda\gamma - \omega^2 a}. \quad (2.25)$$

В (2.24 и 2.25) скорости изменения доплеровской частоты и угла определены в соответствии с (2.18), (2.20) и (2.19), (2.21) через измерения  $f(t)$  и  $\varphi(t)$ :

$$\gamma = f(t)/(t-\tau), \quad (2.26)$$

$$\omega = \varphi(t)/(t-\tau). \quad (2.27)$$

Формулы (2.24 и 2.25) получаются и из (2.16), (2.17) на основе совместного решения уравнений (2.20), (2.21). Кроме того, выражения (2.22, 2.23), (2.24, 2.25) следуют непосредственно из (2.10, 2.11), где  $l(t)$  вычисляется по (2.14) с использованием линейной зависимости  $f(t)$  (2.18), (2.20):

$$l(t) \approx a + \frac{v_y^2(t-\tau)^2 a}{2s(a-s)} \quad \text{или} \quad l(t) \approx a - \frac{\lambda\gamma(t-\tau)^2}{2}.$$

Момент  $\tau$  в уравнениях (2.22) ÷ (2.25) можно определить из условий (2.13), (2.15). Очевидно, что при квазилинейном характере зависимостей  $f(t)$  и  $\varphi(t)$  для этого достаточно двух измерений доплеровской частоты или угла, выполненных в разные моменты времени.

На практике, для уменьшения влияния случайных ошибок измерений, целесообразно проводить аппроксимацию измеренных функций  $f(t)$  и  $\varphi(t)$  полиномами первой степени [26]:

$$f_{\text{appr}}(t) = b_0 + b_1 t, \quad (2.28)$$

$$\varphi_{\text{appr}}(t) = c_0 + c_1 t, \quad (2.29)$$

коэффициенты которых  $b_0$ ,  $b_1$  и  $c_0$ ,  $c_1$  определяются методом наименьших квадратов по нескольким оценкам доплеровской частоты  $f$  и угла  $\varphi$ . Тогда согласно (2.13), (2.15) момент  $\tau$  пересечения целью линии базы можно найти следующим образом:

$$\tau = -b_0/b_1. \quad (2.30)$$

или

$$\tau = -c_0/c_1. \quad (2.31)$$

Подстановка в (2.22, 2.23) или в (2.24, 2.25) значения  $\tau$ , найденного по (2.30) или (2.31), дает возможность определять координаты цели на протяжении всего времени наблюдения, включая начальные моменты.

Следует отметить, что коэффициенты  $b_1$  и  $c_1$  полиномов (2.28), (2.29) имеют размерность скоростей изменения доплеровской частоты и угла и могут непосредственно использоваться в (2.24, 2.25) в качестве их оценок. Так, если значение  $f(t)$  определено по (2.28), и по тем же коэффициентам  $b_0$  и  $b_1$  рассчитан момент  $\tau$  (2.30), то из (2.26) следует

$$y = \frac{f_{\text{appr}}(t)}{t - \tau} = \frac{b_0 + b_1 t}{t + b_0/b_1} = b_1.$$

В [26] приведен пример, представленный на рисунке 2.2. На рисунке показаны рассчитанные по результатам 1000 независимых численных экспериментов графики математического ожидания  $m_x$  (штриховая линия) и среднеквадратичного отклонения  $\sigma_x$  (пунктирная линия) ошибки определения



координаты  $x$  цели по формуле (2.22) в зависимости от времени наблюдения  $t$ . Сплошной линией показан график полной ошибки:

$$\varepsilon_x = \sqrt{m_x + \sigma_x}.$$

Рассмотрена система с  $a = 40$  км,  $\lambda = 1$  м. Цель двигалась со скоростью  $v = 200$  м/с по траектории с  $s = 25$  км,  $\psi = 90^\circ$ .

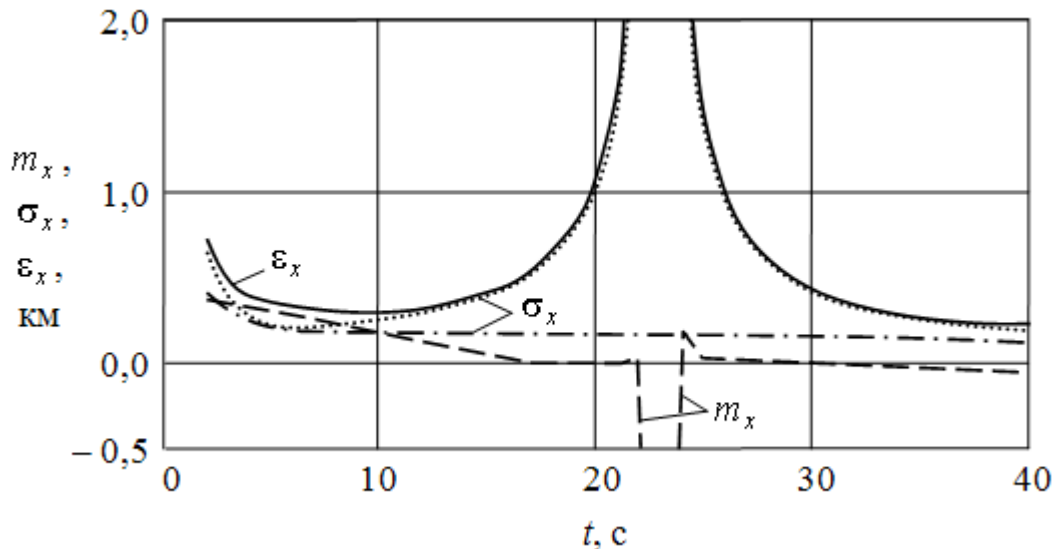


Рисунок 2.2 - Точность определения координаты  $x$  неманеврирующей цели

Зона действия системы условно ограничивалась значениями  $y = \pm 4$  км; соответственно значение ординаты в начале наблюдения (в момент  $t = 0$ ) было  $y = -4$  км. Полагалось, что измерения доплеровской частоты  $f$  и угла  $\varphi$  выполняются независимо и одновременно с интервалом  $\Delta = 1$  с; соответственно наблюдение начиналось ( $t = 0$ ), когда было сделано по одному измерению  $f$  и  $\varphi$ . Текущее время  $t$  и число  $n$  пар одновременно произведенных измерений частоты и угла связаны равенством  $t = (n - 1)\Delta$  или  $n = 1 + t/\Delta$ . Цель пересекала линию базы спустя 20 с после начала наблюдения ( $\tau = 20$  с).

Ошибки измерений  $f$  и  $\varphi$  распределены по нормальному закону со среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_f = 0,2$  Гц частоты и  $\sigma_\varphi = 0,2^\circ$  угла и нулевыми математическими ожиданиями.

В рассмотренном примере относительные ошибки измерений угла  $\varphi$  существенно превосходили относительные ошибки измерений доплеровской частоты:

$$\sigma_\varphi / \varphi(t) \gg \sigma_f / f(t). \quad (2.32)$$

Поэтому момент  $\tau$  определялся по (2.30). Поскольку точность оценки  $\tau$  была максимальной в момент пресечения целью оси  $Ox$  [26], то после пересечения оси  $Ox$  значение  $\tau$  фиксировалось.

Рост ошибки  $\varepsilon_x$  в середине интервала наблюдения объясняется повышенной чувствительностью бистатической системы к погрешностям измерений  $f$  и  $\varphi$  в окрестности линии базы [26, 28]. Оценки координат здесь можно получать экстраполированием оценок, выполненных до пересечения линии базы.

Следует отметить, что формулы (2.24, 2.25) представляют интерес не только для просветных бистатических, но и для многопозиционных РЛС с измерениями доплеровских частот рассеянного сигнала в пространственно разнесенных приемниках. В них величина  $\omega$  может находиться по разности частот в приемниках [26].

## 2.4 Расчет координат маневрирующей цели

Приближенные формулы оставались пригодными только при небольшом отличии законов изменения координат от линейного (2.16), (2.17). Поэтому определение координат маневрирующей цели в бистатических просветных системах имеет свои особенности и требует отдельного рассмотрения [26].

Простейшей моделью движения маневрирующей цели в просветной системе является движение с постоянным ускорением ортогонально линии базы ( $\Psi = 90^\circ$ ) [26]:

$$\begin{aligned} x(t) &= s, \\ y(t) &= g_0 + g_1 t + g_2 t^2, \end{aligned}$$

где  $g_0$  – координата  $y$  в момент начала наблюдения, а мгновенная скорость  $v$  и ускорение  $w$  определяются через коэффициенты  $g_1$  и  $g_2$  как первая и вторая производная от  $y(t)$ , т.е.

$$\begin{aligned} v(t) &= g_1 + 2g_2 t, \\ w &= 2g_2. \end{aligned}$$

На рисунке 2.3 показаны графики точности определения координаты  $x$  цели по формуле (2.22), построенные по результатам 1000 численных экспериментов для условий приведенного выше примера (рисунок 2.2). Отличие состояло в ускорении объекта:  $g_2 = 1 \text{ м/с}^2$  вместо  $g_2 = 0 \text{ м/с}^2$  принятого ранее для рисунка 2.2. В этом случае момент  $\tau$  пересечения целью линии базы имел значение 18,3 с.

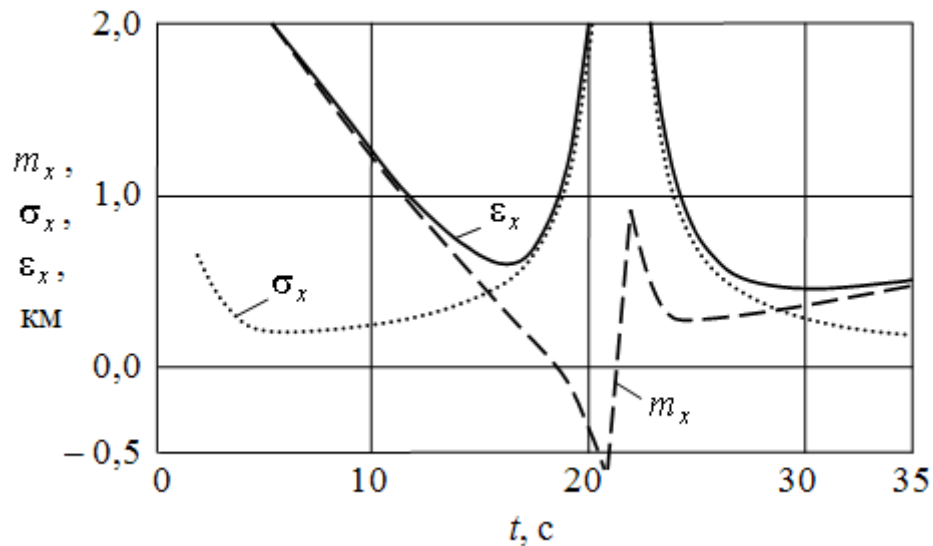


Рисунок 2.3 - Точность определения координаты  $x$  маневрирующей цели

Из рисунка 2.3 видно, что движение цели с ускорением приводило к увеличению систематических ошибок определения координат как до, так и после пересечения целью линии базы. Основной причиной этого является отличие законов изменения доплеровской частоты  $f$  и угла  $\varphi$  от линейных (2.18), (2.19).

Уменьшения систематических ошибок определения координат после пересечения целью линии базы можно, как и в случае неманеврирующей цели, путем дискретного интегрирования оценок доплеровской частоты по (2.14) и оценке координат по (2.4). Так, для примера на рисунке 2.3 интегральный подход (2.4), (2.14) обеспечивал  $m_x \approx 0$ . При этом подход на основе приближений (2.22) и подход (2.4), (2.14) приводили к совпадению графиков среднеквадратичного отклонения на рисунке 2.3 в области  $t > \tau + ((N-1)\Delta/2)$ . Как и ранее, нахождение координат в экспериментах для рисунка 2.3 производилось в центре интервала аппроксимации – в момент  $(t - (N-1)\Delta/2)$ .

До пересечения целью линии базы определение координат цели с уменьшением систематических ошибок возможно по (2.4), (2.14) при помощи экстраполяции измерений доплеровской частоты полиномами более высоких, чем первая, степеней [26]. (Экстраполяция линейным полиномом приводит к ранее полученной формуле (2.22) и результатам, показанным на рисунке 2.3.) Однако использование полиномов второй и более высоких степеней резко повышает дисперсию ошибок определения координат, что делает такие оценки малоэффективными [26].

Восстановить траекторию цели до линии базы можно ретроспективно (с обратным отсчетом времени), также угломерно-дальномерным методом с непосредственным интегрированием доплеровской частоты (2.14).

Получаемые с ретроспективой оценки целесообразно использовать на следующем этапе обработки для уточнения координат после момента  $\tau$ , в

частности – на небольшом удалении от оси Ох, где точность их определения наиболее низкая [26, 28]. При этом возможно применение метода максимального правдоподобия [26] с начальным приближением, найденным по ретроспективным оценкам.

## 2.5 Влияние высоты полета цели

В просветных РЛС влияние высоты полета цели на точность определения плоскостных координат  $x, y$  будет слабым при движении цели с курсами  $\psi$  близкими к  $90^\circ$ . Основная причина этого – слабая зависимость доплеровской частоты от высоты полета  $h$ . Действительно, для малых  $y$  (2.3) и малых высот  $h = \text{const}$  по аналогии с (2.6, 2.7), (2.8) можно записать:

$$r_T = \sqrt{(a-x)^2 + y^2 + h^2} \approx (a-x) + \frac{y^2 + h^2}{2(a-x)},$$

$$r_R = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \approx x + \frac{y^2 + h^2}{2x},$$

$$l = \sqrt{(a-x)^2 + y^2 + h^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \approx a + \frac{y^2 a}{2x(a-x)} + \frac{h^2 a}{2x(a-x)} \quad (2.33)$$

И если  $\psi \approx 90^\circ$  ( $x \approx s = \text{const}$ ), то последнее слагаемое в (2.33) почти неизменно во времени, и производная от  $l(t)$  дает такое же выражение для доплеровской частоты, как и в случае цели двигающейся в плоскости  $xOy$ :

$$f(t) = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl}{dt} \approx -\frac{1}{\lambda} \frac{a}{2s(a-s)} \frac{dy^2(t)}{dt} \quad (2.34)$$

В частности, при  $v_y = \text{const}$  из (2.34) получается (2.18).

Так в [26] говорится, что для рассмотренного на рисунке 2.2 примера, изменение высоты  $h$  в пределах  $0 \div 2$  км практически не влияло на полученные оценки точности определения координат  $x, y$ . И графики, выполненные для  $h = 0$  км (рисунок 2.2) и  $h = 2$  км практически совпадали.

Отклонение курса  $\psi$  до  $90^\circ \pm 20^\circ$  на высоте  $h = 2$  км при прочих равных условиях могло увеличить значение полной ошибки  $\epsilon_x$ , приведенное на рисунке 2.2, примерно на 30%.

Следует отметить, что в случае движения цели на высоте ( $h \neq 0$ ) с курсом  $\psi$  существенно отличным от  $90^\circ$  момент перехода доплеровской частоты через нуль может отличаться от фактического момента пролета цели

над осью Ох. Поэтому оценки  $\tau$  по (2.13) могут быть менее точными, чем по (2.15), даже при относительно малых ошибках измерения доплеровской частоты (2.32).

Если в дополнение к углу (азимуту)  $\varphi$  в просветной системе производить измерения угла места  $\beta$ ,

$$\operatorname{tg} \beta = h / \sqrt{x^2 + y^2},$$

то начальную оценку высоты несложно пересчитать по формуле:

$$h = \operatorname{tg} \beta \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (2.35)$$

Уточнить полученные оценки плоскостных координат  $x$ ,  $y$  и высоты  $h$  полета цели можно на следующем этапе обработки методом максимального правдоподобия.

## 2.6 Двухчастотный фазовый метод измерения суммарной дальности

Наряду с интегральным доплеровским методом измерения суммарной дальности 1 в просветных бистатических и многопозиционных РЛС может найти применение фазовый метод [26], основанный на излучении двух монохроматических колебаний с близкими частотами и сравнении фаз продетектированных сигналов. Суть метода удобно пояснить с помощью упрощенных выражений для излученных  $u_{T1}(t)$ ,  $u_{T2}(t)$ , принимаемых прямых  $u_{R1}(t)$ ,  $u_{R2}(t)$  и рассеянных (Scattered) на цели  $u_{S1}(t)$ ,  $u_{S2}(t)$  колебаний:

$$u_{T1}(t) = U_{T1} \cos(2\pi f_{T1}t - \theta_{T1}),$$

$$u_{T2}(t) = U_{T2} \cos(2\pi f_{T2}t - \theta_{T2}),$$

$$u_{R1}(t) = U_{R1} \cos(2\pi f_{T1}t - \theta_{T1} - k_1 a), \quad (2.36)$$

$$u_{R2}(t) = U_{R2} \cos(2\pi f_{T2}t - \theta_{T2} - k_2 a), \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} u_{S1}(t) &= U_{S1} \cos(2\pi f_{T1}t - \theta_{T1} - k_1 l(t) - \theta_{S1}) = \\ &= U_{S1} \cos\left(2\pi f_{T1}t - \theta_{T1} - k_1 l(t^*) + 2\pi \int_{t^*}^t f_{D1}(t) dt - \theta_{S1}\right), \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned}
u_{S2}(t) &= U_{S2} \cos(2\pi f_{T2}t - \theta_{T2} - k_2 l(t) - \theta_{S2}) = \\
&= U_{S2} \cos\left(2\pi f_{T2}t - \theta_{T2} - k_2 l(t^*) + 2\pi \int_{t^*}^t f_{D2}(t) dt - \theta_{S2}\right)
\end{aligned} \quad (2.39)$$

где  $U_{T1}, U_{T2}$  – амплитуды излученных колебаний;  
 $U_{S1}, U_{S2}, U_{R1}, U_{R2}$  – амплитуды принимаемых колебаний;  
 $f_{T1}, f_{T2}$  – частоты излученных колебаний;  
 $\theta_{T1}, \theta_{T2}$  – начальные фазы излученных колебаний;  
 $\theta_{S1}, \theta_{S2}$  – сдвиги фаз при рассеянии (с учетом близости  $f_{T1}, f_{T2}$  можно принять  $\theta_{S1} \approx \theta_{S2}$ );  
 $k_{1,2} = 2\pi/\lambda_{1,2}$ ,  $\lambda_{1,2} = v_p / f_{T1,2}$  – длина волны;  
 $v_p$  – скорость распространения радиоволн;

$$k_{1,2} l(t) = k_{1,2} l(t^*) - 2\pi \int_{t^*}^t f_{D1,2}(t) dt, \quad (2.40)$$

$f_{D1}(t), f_{D2}(t)$  – доплеровские частоты, определяемые согласно (2.2) как

$$f_{D1,2}(t) = -\frac{1}{\lambda_{1,2}} \frac{dl(t)}{dt}.$$

В приемнике сигналы (2.36), (2.38) отфильтровываются от сигналов (2.37), (2.39). После этого выделение сигнала доплеровской частоты производится амплитудным детектированием суммарного колебания, образованного в результате интерференции рассеянной на цели радиоволны (2.38) (или (2.39)), и более мощной прямой радиоволны (2.36) (или (2.37)) от передатчика.

Фазы протектированных после фильтрации колебаний являются разностями фаз прямых и рассеянных колебаний [26]:

$$\begin{aligned}
\theta_1(t) &= 2\pi f_{T1}t - \theta_{T1} - k_1 a - \left(2\pi f_{T1}t - \theta_{T1} - k_1 l(t^*) + 2\pi \int_{t^*}^t f_{D1}(t) dt - \theta_{S1}\right) = \\
&= k_1 l(t^*) - 2\pi \int_{t^*}^t f_{D1}(t) dt - k_1 a + \theta_{S1},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_2(t) &= 2\pi f_{T2}t - \theta_{T2} - k_2 a - \left( 2\pi f_{T2}t - \theta_{T2} - k_2 l(t^*) + 2\pi \int_{t^*}^t f_{D2}(t) dt - \theta_{S2} \right) = \\ &= k_2 l(t^*) - 2\pi \int_{t^*}^t f_{D2}(t) dt - k_2 a + \theta_{S2}.\end{aligned}$$

Соответственно разность фаз протектированных колебаний с учетом (2.40) и  $\theta_{S1} \approx \theta_{S2}$  будет равна:

$$\theta_2(t) - \theta_1(t) = k_2(l(t) - a) - k_1(l(t) - a) = 2\pi(l(t) - a)(f_{T2} - f_{T1})/v_p. \quad (2.41)$$

Откуда следует, что разность  $(l(t) - a)$  пропорциональна разности фаз протектированных колебаний:

$$l(t) - a = \frac{v_p}{2\pi(f_{T2} - f_{T1})} (\theta_2(t) - \theta_1(t)),$$

или

$$l(t) = \frac{v_p}{2\pi(f_{T2} - f_{T1})} (\theta_2(t) - \theta_1(t)) + a.$$

Для устранения неоднозначности фазовых измерений дальности в пределах всей зоны действия просветной РЛС, как и ранее, по измерениям частот протектированных колебаний и условию (2.13), или по измерению угла  $\varphi$  и условию (2.15) можно определять момент пересечения целью линии базы. После чего однозначность измерений обеспечивается непрерывным наблюдением за изменением разности фаз (2.41) и подсчетом целого числа циклов изменения разности фаз.

До пересечения целью линии базы однозначная оценка дальности фазовым методом возможна в случае равномерного и прямолинейного движения цели и предварительной оценки  $l$  по (2.14) с экстраполяцией измеренной зависимости доплеровской частоты  $f_{D1}(t)$  или  $f_{D2}(t)$  [26].

## 2.7 Анализ потока мощности сигнала в БРЛС

При умеренных значениях бистатического угла согласно «теореме эквивалентности» бистатическая эффективная площадь рассеяния обычно близка к однопозиционной, однако по мере приближения угла к 180 градусам картина резко меняется [9].

Из теории электромагнитного поля известно, что если на пути распространения волны поместить абсолютно черное тело (поглощающее всю падающую на него энергию) конечных, но больших по сравнению с длиной волны размеров, то позади тела появится поле рассеяния («тенивое» поле). Существенно, что поле рассеяния абсолютно черного тела не зависит от формы поверхности тела и полностью определяется его теневым контуром, т.е. границей освещенной части поверхности.[9]

У реальной цели помимо теневого возникает и «обычное» собственное поле рассеяния, которое возбуждается токами, наведенными на поверхности цели падающей волной. Однако, при анализе поля рассеяния вблизи бистатического угла равном 180 градусам, можно пренебречь влиянием токов на поверхности цели, т.е. считать реальную цель абсолютно черным телом, создающим только тенивое поле рассеяния [9].

Таким образом, уровень мощности приемного сигнала при распространении в свободном пространстве (прямая видимость) и без затенения объектом можно представить формулой Фрииса [29]:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{из}} \times c^2 / (4 \times \pi \times r \times f)^2, \quad (2.42)$$

- где  $P_{\text{пр}}$  – мощность сигнала на приемной стороне, Вт;  
 $P_{\text{из}}$  – мощность сигнала на передающей стороне, Вт;  
 $c$  – скорость распространения сигнала в пространстве, м/с;  
 $r$  – расстояние между передающей и приемной антеннами, м;  
 $f$  – частота передачи сигнала, Гц.

При приближении объекта к базовой линии БРЛС, объект перекрывает поток мощности, идущий от передатчика к приемнику и ведет себя как абсолютно черное тело, т.е. поглощает часть энергии падающей на ее поверхность. В реальности же никакого поглощения может и не быть, объект просто рассеивает энергию, падающую на него, в разных направлениях, и тем самым уменьшает поток мощности на приемной стороне БРЛС.

На рисунке 2.5 представлено затухание сигнала (коэффициент ослабления по отношению к свободному пространству) при перекрытии зон Френеля (например, клиновидного непрозрачного экрана) как показано на рисунке 2.4.



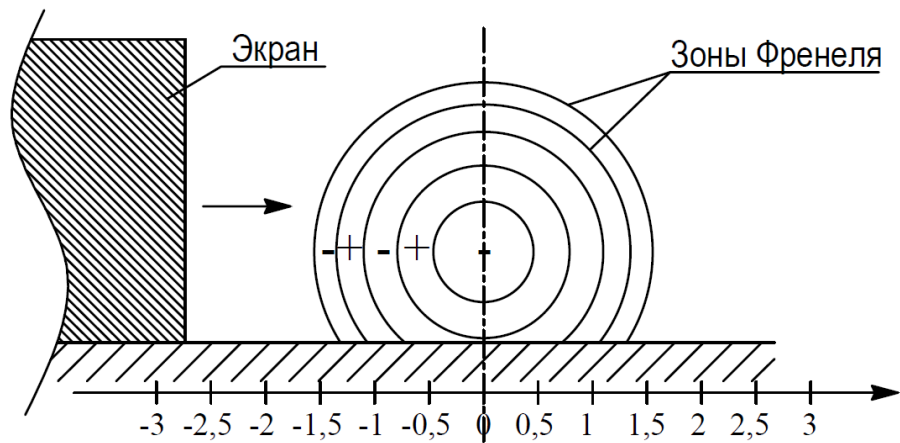


Рисунок 2.4 – Перекрывание зоны обнаружения, представленной в виде зон Френеля

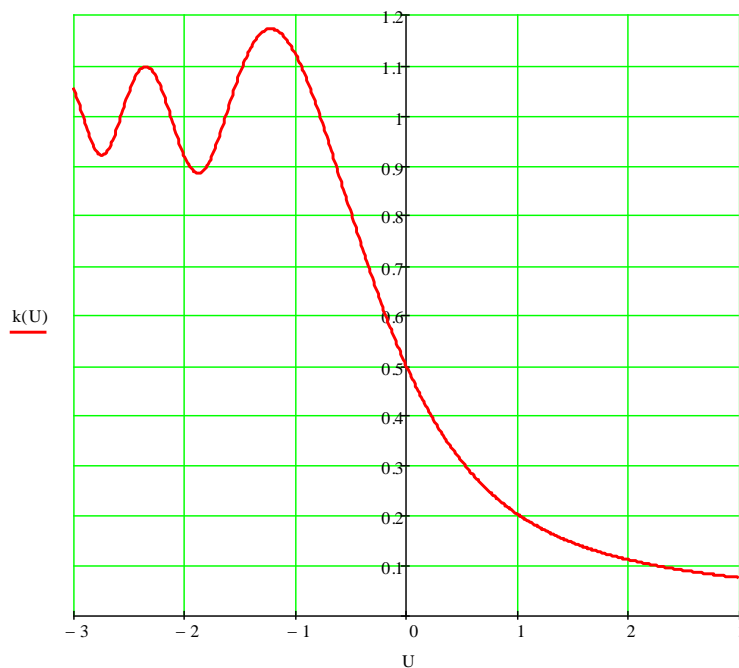


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента ослабления от величины просвета в соответствии с формулой (2.43)

Коэффициент ослабления определяется по формуле [30]:

$$k = \frac{E}{E_0} = \sqrt{\frac{C(u)^2 + S(u)^2}{2}} \cdot e^{i\gamma}, \quad (2.43)$$

где  $\text{tg}\gamma = S(u)/C(u)$ ;  
 $S(u)$  и  $C(u)$  – интегралы Френеля, определяемые по следующим формулам:

$$C(u) = \frac{1}{2} - \int_0^u \cos \frac{\pi \cdot x^2}{2} dx, \quad (2.44)$$

$$S(u) = \frac{1}{2} - \int_0^u \sin \frac{\pi \cdot x^2}{2} dx, \quad (2.45)$$

Параметр  $u$  имеет значение:

$$u = \frac{\sqrt{2} \cdot H}{R_0}, \quad (2.46)$$

где  $R_0$  – радиус нулевой зоны Френеля в месте расположения препятствия;

$H$  – длина экрана, перекрывающая поток мощности (со знаком минус – экран приближается к базовой линии; со знаком плюс – экран перекрыл половину зон Френеля и продолжает перекрывать оставшуюся).

Из рисунка следует, что, когда все зоны Френеля перекрыты наполовину ( $U = 0$ ), напряженность поля в точке приема составляет  $0,5 \cdot E_0$ . При увеличении степени закрытия трассы ( $U > 0$ ) поле в точке приема быстро падает, а с увеличением просвета ( $U < 0$ ) поле растет до величины  $1,16E_0$ , а затем осциллируя, приближается к полю свободного пространства.

## 2.8 Выводы

В процессе оценки возможностей бистатических РЛС было установлено, что наряду с преимуществами, имеются и большие сложности и недостатки БРЛС, например, синхронизация двух разнесенных устройств, бистатическая РЛС, основанная на эффекте Доплера, формально не позволяет отслеживать траекторию движения цели до пересечения ею линии базы, возникают ошибки при переменной скорости объекта, доплеровский эффект не проявляется при неподвижном объекте, что ведет к невозможности оценить положение неподвижных и малоподвижных целей (например, вертолета).

Установлено, что применение находит многопозиционная радиолокация, основанная на бистатической РЛС, например, в системах управления воздушным движением (УВД), в противовоздушной и противоракетной обороне (ПВО и ПРО), для наблюдения космических объектов, различных метеорологических явлений и в других информационных системах народно-хозяйственного, научного и военного назначения.

Для оценки возможности альтернативных вариантов бистатическим РЛС, использующих частоту доплера, целесообразно оценить информацию об изменении мощности сигнала вблизи базовой линии бистатической РЛС при наличии цели.

### **3 Экспериментальное исследование мощности распространения сигнала в БРЛС**

Как уже отмечалось, местоположение цели в бистатических РЛС определяется по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала. Однако, вблизи базовой линии эффект Доплера практически не проявляется, что приводит к ошибкам в определении положения объекта.

Для повышения точности определения положения объекта в работе предлагается провести экспериментальное исследование влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала приемника.

В эксперименте используются передатчик и приемник, разнесенные в пространстве прямой видимости. Учитывая, что измеряемой (исследуемой) величиной является мощность, то в качестве установки необходимо использовать оборудование позволяющее фиксировать (оценивать) мощность сигнала. Таковую возможность предоставляет оборудование ZigBee, т.к. в комплекте с оборудованием идет приложение, позволяющее фиксировать изменения мощности сигнала на приемной стороне. Поэтому в исследовании (эксперименте) применяется оборудование ZigBee.

Также необходимо отметить, что реальный радиолокационный комплекс, например «Барьер-Е», имеет протяженность одного звена до 50 км, диапазон частот - 390-430 МГц, а мощность излучения составляет 1-3 Вт. В эксперименте используется оборудование ZigBee, позволяющее фиксировать (оценивать) изменения мощности сигнала на приемной стороне. Оборудование работает в частотном диапазоне 2400-2483.5 МГц, имеет штыревую антенну с круговой диаграммой направленности, а мощность излучения составляет менее 1 мВт.

#### **3.1 Исследование влияния местности на мощность сигнала приемника**

Для более детального исследования влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала приемника, необходимо учесть и воздействие, которое оказывает выбранная местность на исследуемый параметр (мощность сигнала), в частности подстилающая поверхность.

В эксперименте передатчик и приемник разносятся постепенно от 0 до 20 метров (прямая видимость) с шагом 1 и 2,5 метров. Передающая и приемная антенны располагаются на высоте 1 (одного) метра от поверхности земли, т.к. максимальный радиус первой зоны Френеля в точке, расположенной посередине между антеннами, для частоты 2,4 ГГц равен 0,79 метра, при разнесении на 20 метров. На каждом отрезке фиксируется мощность приемного сигнала. Для более точного снятия показаний, эксперимент проводится 10 раз. По снятым показаниям высчитывается математическое ожидание, по которым построятся зависимости.

На рисунке 3.1 представлена схема проведения эксперимента (вид сбоку).

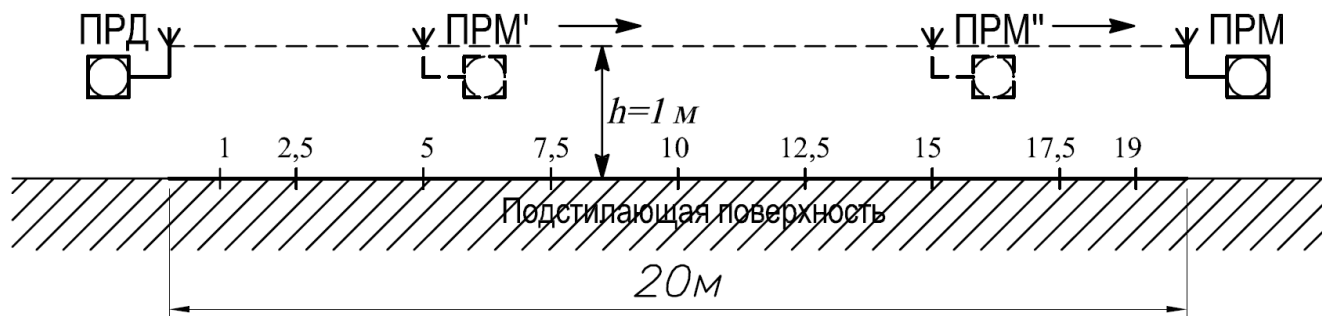


Рисунок 3.1 – Схема проведения эксперимента на различных местностях

Эксперимент проводился в двух следующих местностях в разное время года:

1 – степь в начале мая (подстилаящая поверхность трава и влажный гумусовый слой земли);

2 – степь в середине июля (подстилаящая поверхность сухая земля без травяного покрытия);

3 - футбольное поле в начале июня (подстилаящая поверхность – искусственный газон);

4 - футбольное поле в середине июля (подстилаящая поверхность – искусственный газон).

В таблице 3.1 представлены результаты экспериментального исследования влияния подстилаящей поверхности на уровень мощности приемного сигнала, проведенного в степи в начале мая.

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента, проводимого в степи в мае месяце

Расстояние разноса ПРД/ПРМ, м	Номер эксперимента										М, дБм	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
1	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
2,5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
7,5	-40	-40	-41	-40	-41	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40,2
10	-40	-40	-40	-41	-41	-40	-40	-40	-40	-41	-40	-40,3
12,5	-41	-40	-41	-40	-40	-41	-40	-40	-40	-40	-40	-40,3
15	-47	-46	-45	-48	-47	-48	-58	-49	-49	-48	-48,5	-48,5
17,5	-50	-49	-58	-59	-58	-59	-57	-59	-58	-57	-56,4	-56,4
19	-58	-56	-63	-59	-64	-61	-59	-58	-60	-57	-59,5	-59,5
20	-57	-64	-53	-54	-56	-55	-58	-56	-58	-56	-56,7	-56,7

По рассчитанному математическому ожиданию  $M$ , строится график. На рисунке 3.2 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для степи в начале мая.

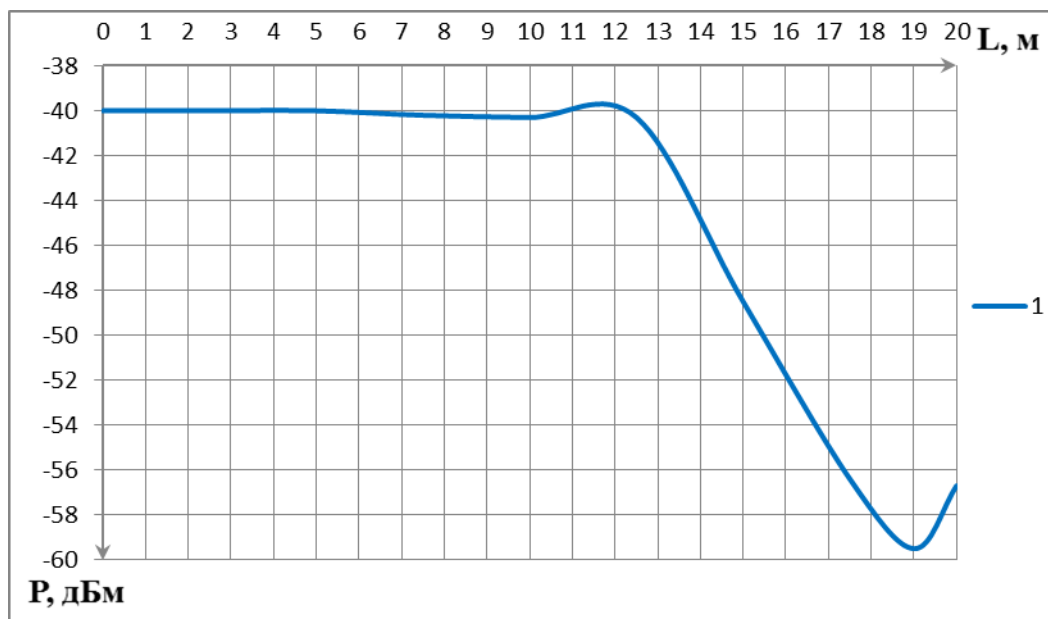


Рисунок 3.2 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для степи (май)

В таблице 3.2 представлены результаты экспериментального исследования влияния подстилающей поверхности на уровень мощности приемного сигнала, проведенного в степи в середине июля.

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента, проводимого в степи в июле месяце

Расстояние разности ПРД/ПРМ, м	Номер эксперимента										M, дБм	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
2,5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
7,5	-40	-40	-40	-41	-40	-40	-42	-42	-40	-40	-40	-40,5
10	-48	-43	-40	-46	-43	-42	-45	-44	-43	-41	-41	-43,5
12,5	-45	-50	-51	-55	-60	-46	-49	-47	-51	-50	-50	-50,4
15	-42	-44	-43	-45	-44	-42	-43	-42	-46	-45	-45	-43,6
17,5	-60	-55	-52	-51	-49	-58	-55	-55	-54	-55	-55	-54,4
20	-46	-48	-49	-47	-46	-47	-48	-48	-48	-48	-49	-47,6

На рисунке 3.3 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для степи в середине июля.

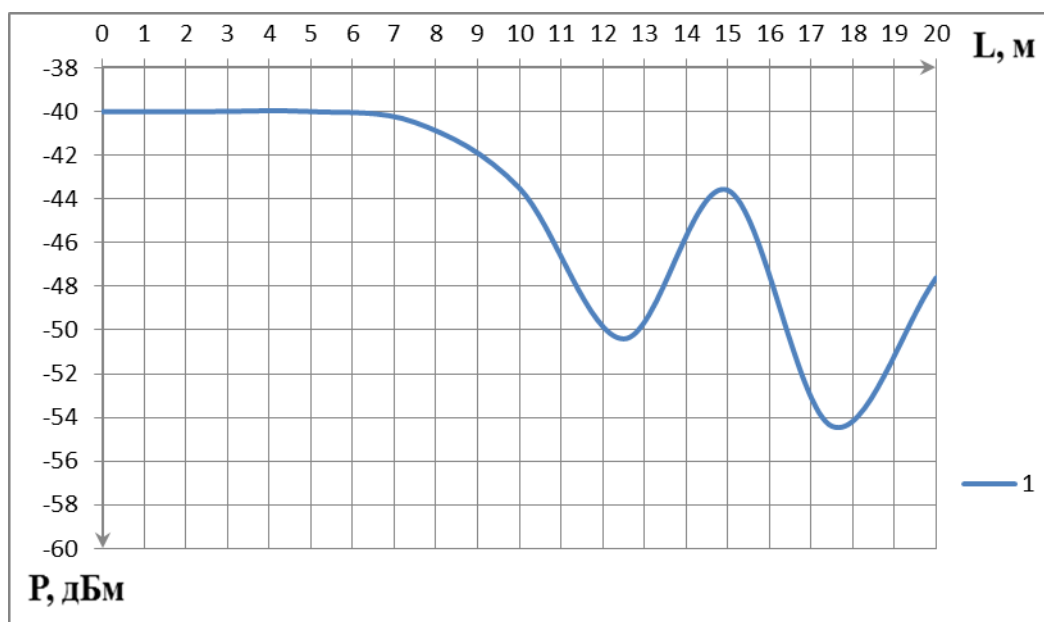


Рисунок 3.3 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для степи (июль)

В таблице 3.3 представлены результаты экспериментального исследования влияния подстилающей поверхности на уровень мощности приемного сигнала, проведенного на футбольном поле в начале июня.

Таблица 3.3 – Результаты эксперимента, проводимого на футбольном поле в июне месяце

Расстояние разности ПРД/ПРМ, м	Номер эксперимента										M, дБм	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
2,5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
5	-40	-42	-41	-40	-40	-41	-40	-40	-40	-40	-41	-40,5
7,5	-40	-40	-43	-44	-45	-44	-43	-41	-41	-41	-41	-42,2
10	-48	-43	-40	-46	-43	-42	-45	-44	-43	-41	-41	-43,5
12,5	-45	-50	-51	-55	-60	-46	-49	-47	-51	-50	-50	-50,4
15	-49	-46	-47	-55	-50	-49	-51	-50	-56	-54	-54	-50,7
17,5	-54	-56	-59	-58	-58	-56	-51	-52	-54	-53	-53	-55,1
20	-48	-49	-48	-50	-49	-48	-49	-49	-49	-49	-49	-48,8

На рисунке 3.4 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для футбольного поля в июне.

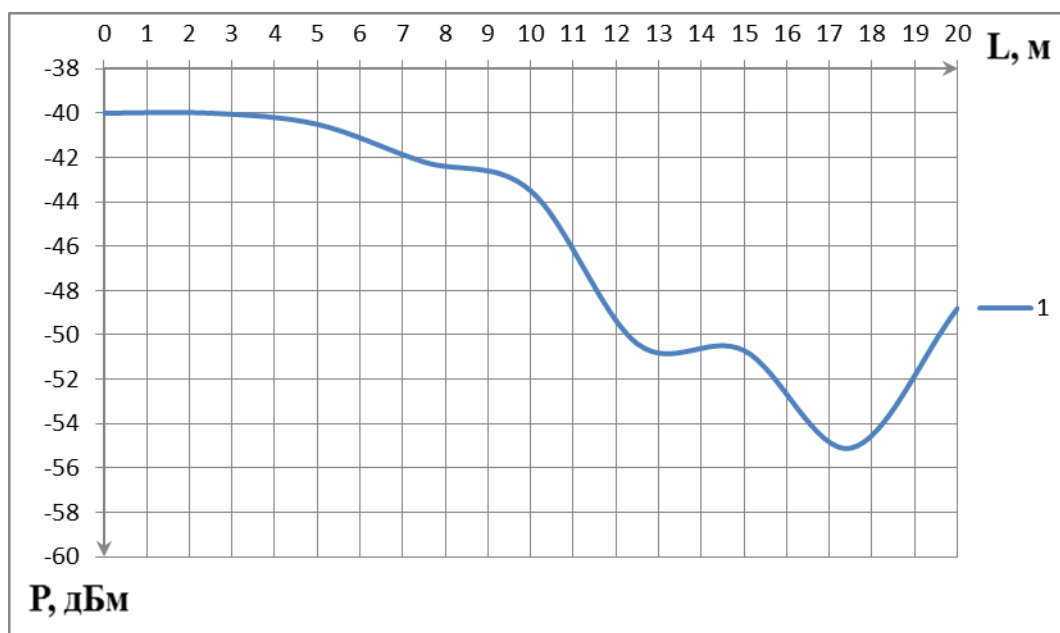


Рисунок 3.4 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для футбольного поля (июнь)

В таблице 3.4 представлены результаты экспериментального исследования влияния подстилающей поверхности на уровень мощности приемного сигнала, проведенного на футбольном поле в середине июля.

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента, проводимого на футбольном поле в июле месяце

Расстояние разности ПРД/ПРМ, м	Номер эксперимента										M, дБм	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
2,5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
5	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
7,5	-40	-40	-40	-41	-40	-40	-42	-42	-40	-40	-40,5	
10	-44	-42	-40	-42	-40	-40	-40	-40	-44	-40	-41,2	
12,5	-43	-42	-46	-44	-41	-40	-44	-45	-43	-45	-43,3	
15	-49	-53	-52	-54	-52	-54	-50	-58	-55	-52	-52,9	
17,5	-55	-55	-56	-57	-55	-51	-56	-53	-55	-53	-54,6	
20	-42	-43	-41	-42	-43	-43	-42	-42	-43	-44	-42,5	

На рисунке 3.5 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для футбольного поля в июле.

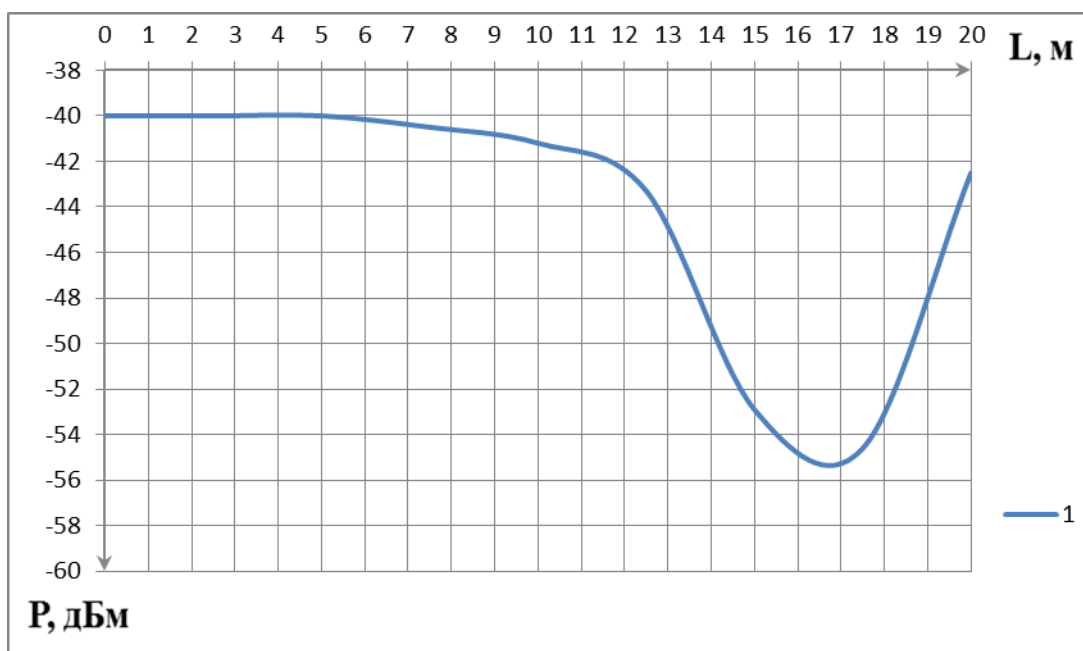


Рисунок 3.5 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния для футбольного поля (июль)

Таким образом, эксперимент позволил построить характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от расстояния, проводимый в разное время года для двух подстилающих поверхностей:

1 – степь в начале мая (подстилающая поверхность трава и влажный гумусовый слой земли);

2 – степь в середине июля (подстилающая поверхность сухая земля без травяного покрытия);

3 - футбольное поле в начале июня (подстилающая поверхность – искусственный газон);

4 - футбольное поле в середине июля (подстилающая поверхность – искусственный газон).

В данном эксперименте наблюдается затухание мощности принимаемого сигнала с увеличением расстояния, что говорит о правильности работы установки. Однако неравномерное затухание и различные уровни мощности сигнала, при разнесении на 20 метров, говорят о влиянии местности (подстилающей поверхности) и времени года на уровень мощности принимаемого сигнала.



### 3.2 Исследование влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала на футбольном поле

Исследование влияния положения объекта вблизи базовой линии на мощность сигнала является основным экспериментом диссертации. По его результатам можно будет говорить о возможности или невозможности фиксировать цель (объект) вблизи базовой линии бистатической радиолокационной станции по уровню мощности приемного сигнала.

В действительности данный эксперимент проводился на всех перечисленных выше местностях, но в связи с тем, что результаты экспериментов показывали одно и то же, то в данном разделе приведены результаты экспериментального исследования только для одной местности – футбольного поля.

В данном эксперименте, в отличие от предыдущего, передатчик и приемник разнесены на расстояние 20 метров. Антенны расположены также на высоте 1 метра от поверхности земли. Из предыдущего эксперимента определяется уровень мощности приемного сигнала при отсутствии объекта вблизи базовой линии, для соответствующего разнесения передатчика и приемника. В качестве цели (объекта) используется взрослый человек, ростом 1,65 и шириной в плечах 0,4 метров. Объект (человек) передвигается между передатчиком и приемником с шагом 1 и 2,5 метров. Двигаясь вдоль базовой линии на различных расстояниях от нее, объект будет перекрывать поток мощности, тем самым изменять уровень приемного сигнала. Также как и в предыдущем эксперименте, для повышения точности результатов исследования, измерения проводятся 10 раз, по которым рассчитывается математическое ожидание  $M$  и строятся графики.

Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 3.6 (вид сверху).

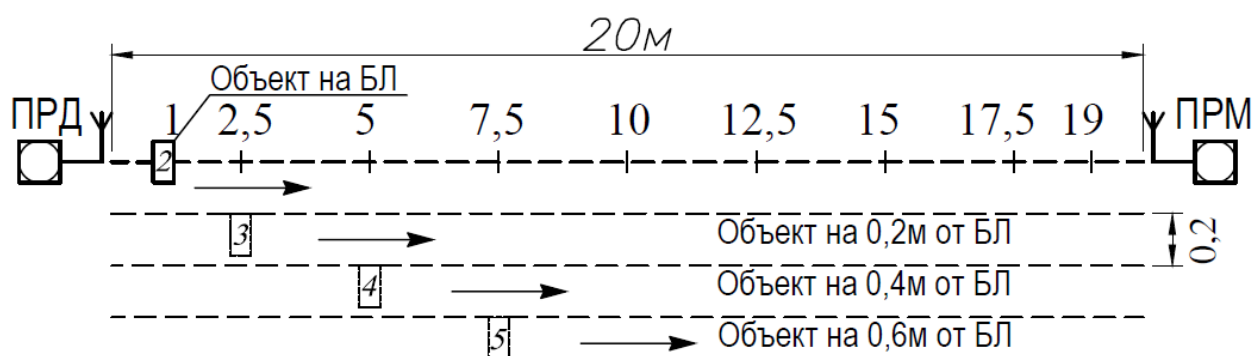


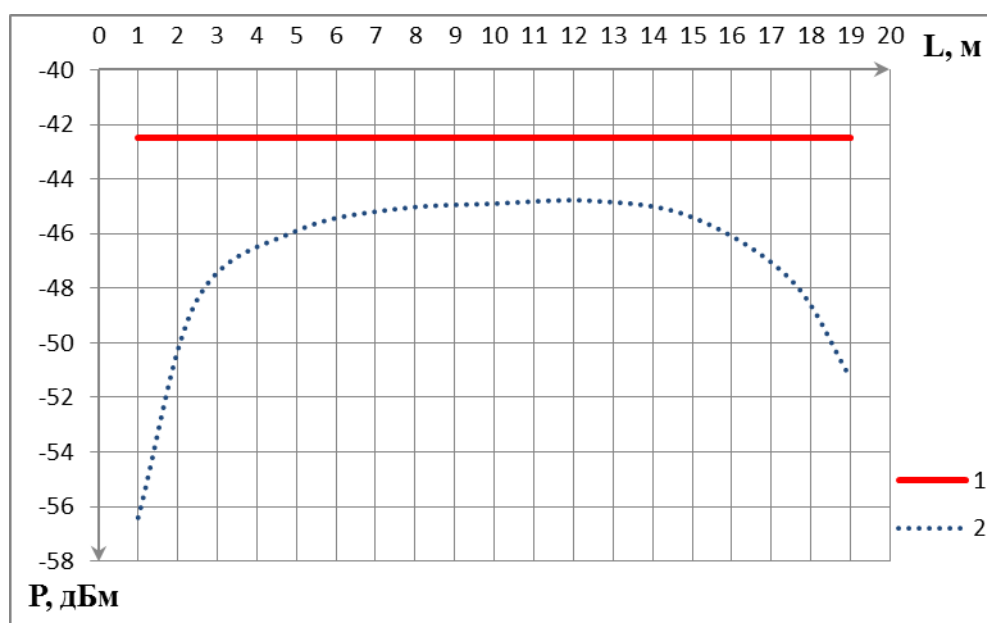
Рисунок 3.6 – Схема проведения эксперимента с объектом на футбольном поле (вид сверху)

В таблице 3.5 представлены результаты экспериментального исследования влияния объекта на уровень мощности приемного сигнала, передвигающегося по базовой линии (позиция 2 на рисунке 3.6).

Таблица 3.5 – Результаты эксперимента, при перемещении объекта по базовой линии

Расстояние от ПРД до объекта, м	Номер эксперимента										М, дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-52	-57	-56	-57	-57	-58	-57	-56	-57	-57	-56,4
2,5	-47	-49	-50	-48	-46	-48	-49	-48	-50	-49	-48,4
5	-45	-46	-47	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-45	-45,9
7,5	-45	-44	-46	-46	-46	-45	-44	-46	-44	-45	-45,1
10	-46	-45	-46	-45	-44	-45	-44	-44	-44	-46	-44,9
12,5	-44	-46	-46	-44	-45	-46	-44	-44	-45	-44	-44,8
15	-45	-46	-45	-45	-46	-45	-45	-46	-46	-45	-45,4
17,5	-49	-48	-47	-48	-47	-49	-48	-47	-47	-47	-47,7
19	-53	-51	-50	-49	-50	-51	-51	-52	-54	-52	-51,3

На рисунке 3.7 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта по базовой линии.



1 – уровень мощности без объекта;  
2 – уровень мощности, когда объект перемещается по БЛ

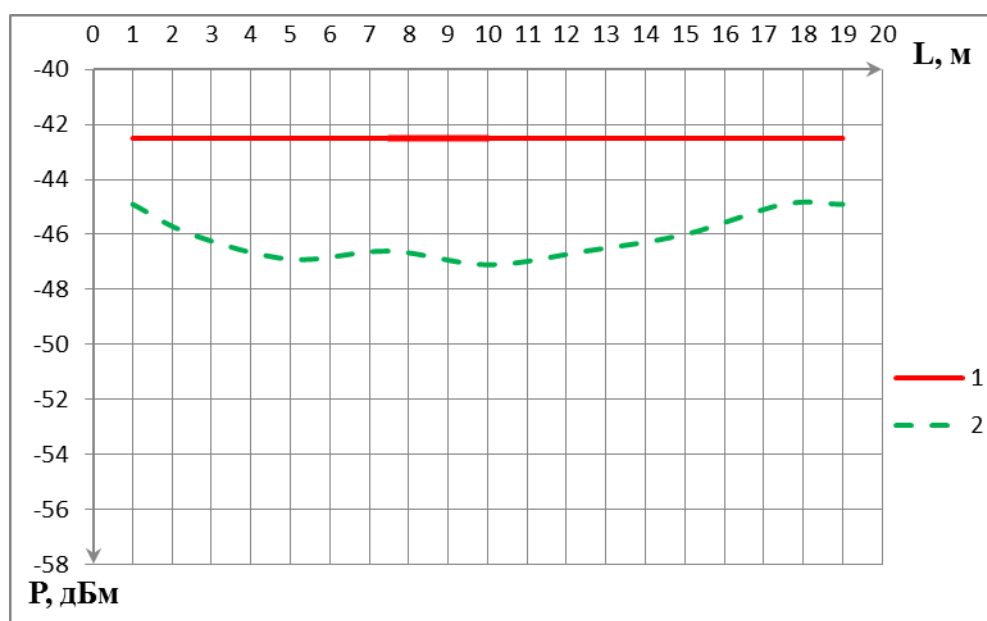
Рисунок 3.7 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта по БЛ

В таблице 3.6 представлены результаты экспериментального исследования влияния объекта на уровень мощности приемного сигнала, передвигающегося на расстоянии 0,2 метра от базовой линии (позиция 3 на рисунке 3.6).

Таблица 3.6 – Результаты эксперимента, при перемещении объекта на 0,2 м от базовой линии

Расстояние от ПРД до объекта, м	Номер эксперимента										М, дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-46	-46	-44	-45	-45	-44	-45	-42	-46	-46	-44,9
2,5	-45	-46	-46	-46	-45	-46	-46	-47	-47	-46	-46
5	-47	-47	-46	-46	-50	-47	-46	-47	-47	-46	-46,9
7,5	-48	-46	-47	-46	-46	-47	-46	-46	-46	-48	-46,6
10	-47	-48	-47	-50	-46	-46	-48	-46	-47	-46	-47,1
12,5	-46	-47	-46	-46	-51	-46	-46	-46	-46	-46	-46,6
15	-46	-45	-46	-45	-46	-48	-47	-46	-46	-45	-46
17,5	-44	-44	-45	-45	-45	-44	-45	-46	-46	-45	-44,9
19	-46	-44	-45	-46	-44	-45	-46	-44	-44	-45	-44,9

На рисунке 3.8 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта вдоль базовой линии на расстоянии 0,2 метра от нее.



1 – уровень мощности без объекта;

2 – уровень мощности, когда объект перемещается на расстоянии 0,2 м от БЛ

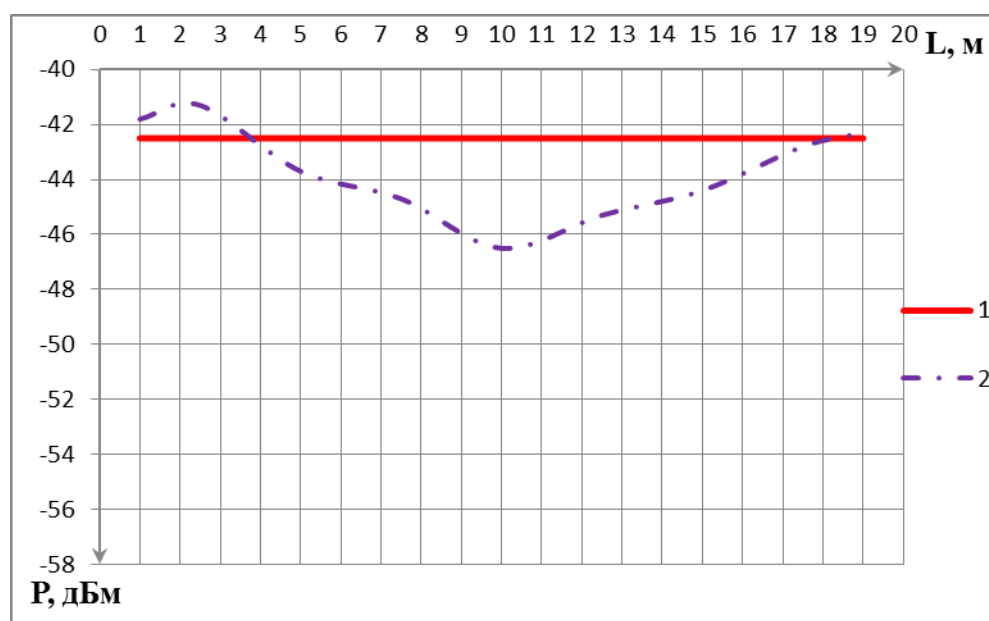
Рисунок 3.8 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта на расстоянии 0,2 м от БЛ

В таблице 3.7 представлены результаты экспериментального исследования влияния объекта на уровень мощности приемного сигнала, передвигающегося на расстоянии 0,4 метра от базовой линии (позиция 4 на рисунке 3.6).

Таблица 3.7 – Результаты эксперимента, при перемещении объекта на 0,4 м от базовой линии

Расстояние от ПРД до объекта, м	Номер эксперимента										М, дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-41	-42	-42	-40	-41	-41	-41	-46	-43	-41	-41,8
2,5	-43	-42	-40	-41	-43	-42	-40	-41	-41	-40	-41,3
5	-44	-45	-44	-43	-43	-42	-44	-44	-43	-45	-43,7
7,5	-45	-45	-44	-45	-45	-45	-45	-45	-44	-44	-44,7
10	-46	-47	-46	-45	-46	-47	-48	-46	-47	-47	-46,5
12,5	-46	-46	-46	-45	-46	-46	-45	-46	-42	-45	-45,3
15	-45	-44	-43	-44	-45	-45	-44	-44	-45	-45	-44,4
17,5	-43	-42	-43	-43	-42	-43	-42	-43	-44	-43	-42,8
19	-42	-41	-43	-42	-43	-42	-43	-42	-42	-43	-42,3

На рисунке 3.9 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта вдоль базовой линии на расстоянии 0,4 метра от нее.



1 – уровень мощности без объекта;

2 – уровень мощности, когда объект перемещается на расстоянии 0,4 м от БЛ

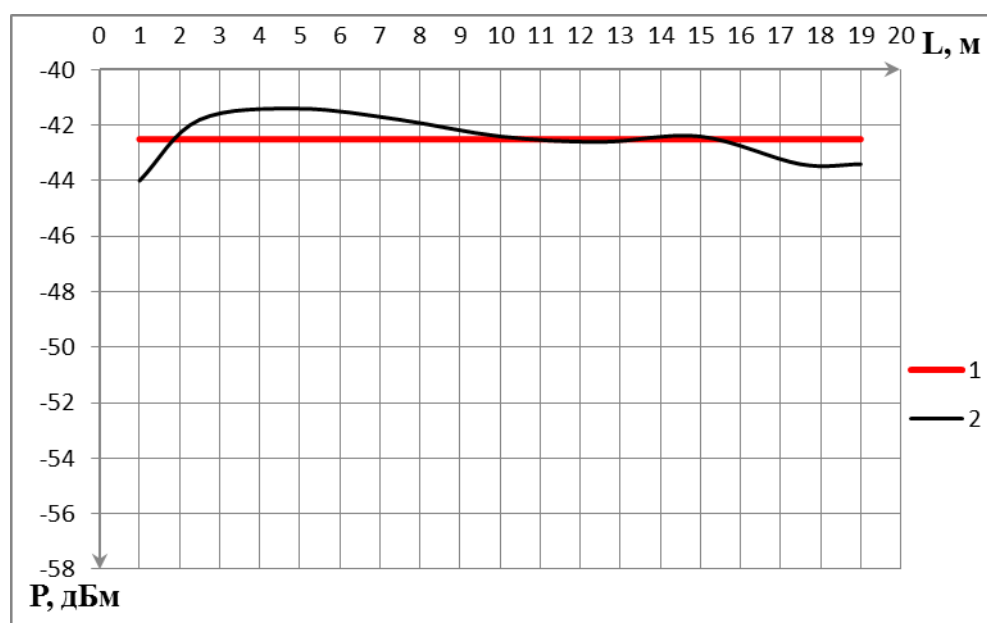
Рисунок 3.9 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта на расстоянии 0,4 м от БЛ

В таблице 3.8 представлены результаты экспериментального исследования влияния объекта на уровень мощности приемного сигнала, передвигающегося на расстоянии 0,6 метра от базовой линии (позиция 5 на рисунке 3.6).

Таблица 3.8 – Результаты эксперимента, при перемещении объекта на 0,6 м от базовой линии

Расстояние от ПРД до объекта, м	Номер эксперимента										М, дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-45	-43	-43	-45	-44	-44	-44	-43	-44	-45	-44
2,5	-43	-42	-41	-41	-42	-42	-45	-43	-42	-44	-41,8
5	-42	-42	-42	-41	-40	-42	-42	-43	-42	-43	-41,4
7,5	-41	-42	-41	-42	-43	-42	-41	-41	-41	-42	-41,8
10	-42	-42	-42	-43	-43	-42	-43	-43	-40	-42	-42,4
12,5	-42	-43	-42	-43	-43	-42	-42	-43	-42	-43	-42,6
15	-42	-43	-43	-42	-42	-43	-41	-42	-42	-42	-42,4
17,5	-44	-44	-43	-42	-44	-42	-40	-44	-44	-43	-43,4
19	-44	-43	-41	-45	-44	-42	-44	-42	-43	-43	-43,4

На рисунке 3.10 представлена характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта вдоль базовой линии на расстоянии 0,6 метра от нее.



1 – уровень мощности без объекта;

2 – уровень мощности, когда объект перемещается на расстоянии 0,6 м от БЛ

Рисунок 3.10 – Характеристика зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от передвигающегося объекта на расстоянии 0,6 м от БЛ

Таким образом, второй эксперимент, проводимый на футбольном поле, показывает сильное ослабление уровня мощности принимаемого сигнала, вносимое объектом на базовой линии (кривая 2 на рисунке 3.7). Причем, ослабление увеличивается с приближением объекта к передающей (приемной)

антенне, за счет большего перекрытия потока энергии. Ослабление уровня мощности сигнала, также обеспечивается и при отклонении объектом от базовой линии на расстояние до 0,4 метра (кривые 2 на рисунках 3.8 и 3.9). Однако, при нахождении объекта на расстоянии 0,6 метра от базовой линии влияние незначительное (кривая 2 на рисунке 3.10). Таким образом, из этого эксперимента следует, что объект оказывает значительное влияние на уровень мощности принимаемого сигнала в радиусе нулевой зоны Френеля, равное 0,46 метра.

### 3.2.1 Анализ мощности сигнала при пересечении объектом БЛ

Проанализируем влияние объекта на уровень мощности приемного сигнала при приближении объекта к базовой линии БРЛС в трех точках: возле передатчика, в середине БЛ и возле приемника. Воспользуемся результатами эксперимента, описанного выше.

По формуле определим дисперсию D:

$$D = \delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n-1} \quad (3.1)$$

где  $\delta$  – среднеквадратическое отклонение;  
M – математическое ожидание;  
n – количество параллельных экспериментов;  
x – значение эксперимента.

Из полученной дисперсии вычислим среднеквадратическое отклонение, по которой построим кривые. Вычисленные значения дисперсии и среднеквадратического отклонения представлены в таблицах 3.9-3.11.

В таблице 3.9 представлены результаты эксперимента, когда объект приближается к БЛ по центру между передатчиком и приемником.

Таблица 3.9 – Уровень мощности приемного сигнала при приближении объекта к БЛ по центру

Расстояние до БЛ, м	Номер эксперимента										M, дБм	D, дБм	$\delta$ , дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
0,6	-42	-42	-42	-43	-43	-42	-43	-43	-40	-42	-42,2	0,84	0,92
0,4	-46	-47	-46	-45	-46	-47	-48	-46	-47	-47	-46,5	0,72	0,85
0,2	-47	-48	-47	-50	-46	-46	-48	-46	-47	-46	-47,1	1,66	1,29
0	-46	-45	-46	-45	-44	-45	-44	-44	-44	-46	-44,9	0,77	0,88

В таблице 3.10 представлены результаты эксперимента, когда объект приближается к БЛ возле передатчика.

Таблица 3.10 – Уровень мощности приемного сигнала при приближении объекта к БЛ возле ПРД

Расстояние до БЛ, м	Номер эксперимента										M, дБм	D, дБм	$\delta$ , дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
0,6	-45	-43	-43	-45	-44	-44	-44	-43	-44	-45	-44	0,67	0,82
0,4	-41	-42	-42	-40	-41	-41	-41	-46	-43	-41	-41,8	2,84	1,69
0,2	-46	-46	-44	-45	-45	-44	-45	-42	-46	-46	-44,9	1,66	1,29
0	-52	-57	-56	-57	-57	-58	-57	-56	-57	-57	-56,4	2,71	1,65

В таблице 3.11 представлены результаты эксперимента, когда объект приближается к БЛ возле приемника.

Таблица 3.11 – Уровень мощности приемного сигнала при приближении объекта к БЛ возле ПРМ

Расстояние до БЛ, м	Номер эксперимента										M, дБм	D, дБм	$\delta$ , дБм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
0,6	-44	-43	-41	-45	-44	-42	-44	-42	-43	-43	-43,1	1,43	1,2
0,4	-42	-41	-43	-42	-43	-42	-43	-42	-42	-43	-42,3	0,46	0,67
0,2	-46	-44	-45	-46	-44	-45	-46	-44	-44	-45	-44,9	0,77	0,88
0	-53	-51	-50	-49	-50	-51	-51	-52	-54	-52	-51,3	2,23	1,49

Графическое представление затухания уровня мощности представлено на рисунке 3.11, а среднеквадратическое отклонение – на рисунке 3.12.

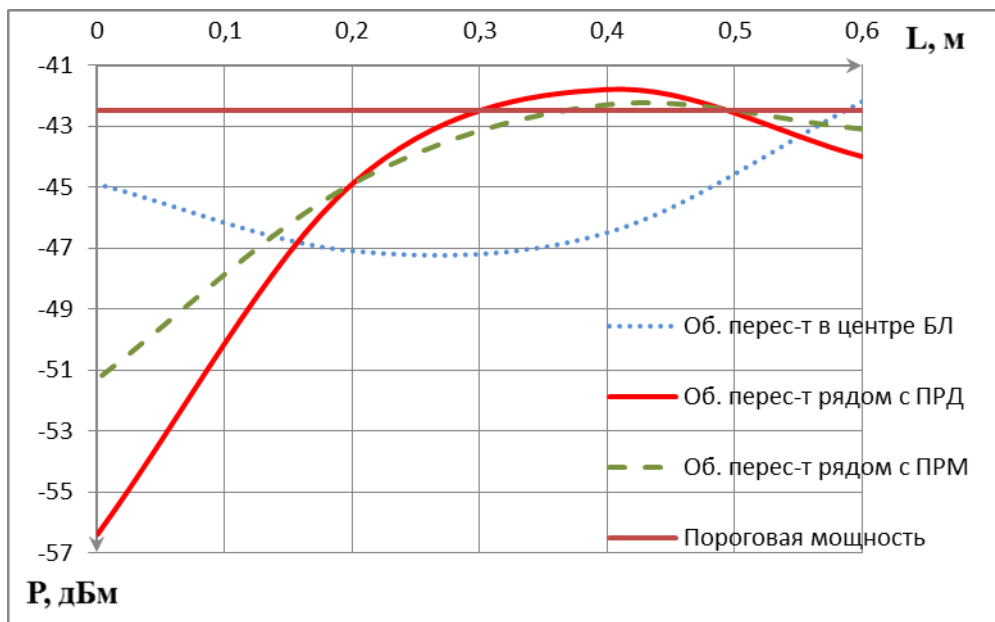


Рисунок 3.11 – Характеристики зависимости уровня мощности принимаемого сигнала от приближающегося объекта

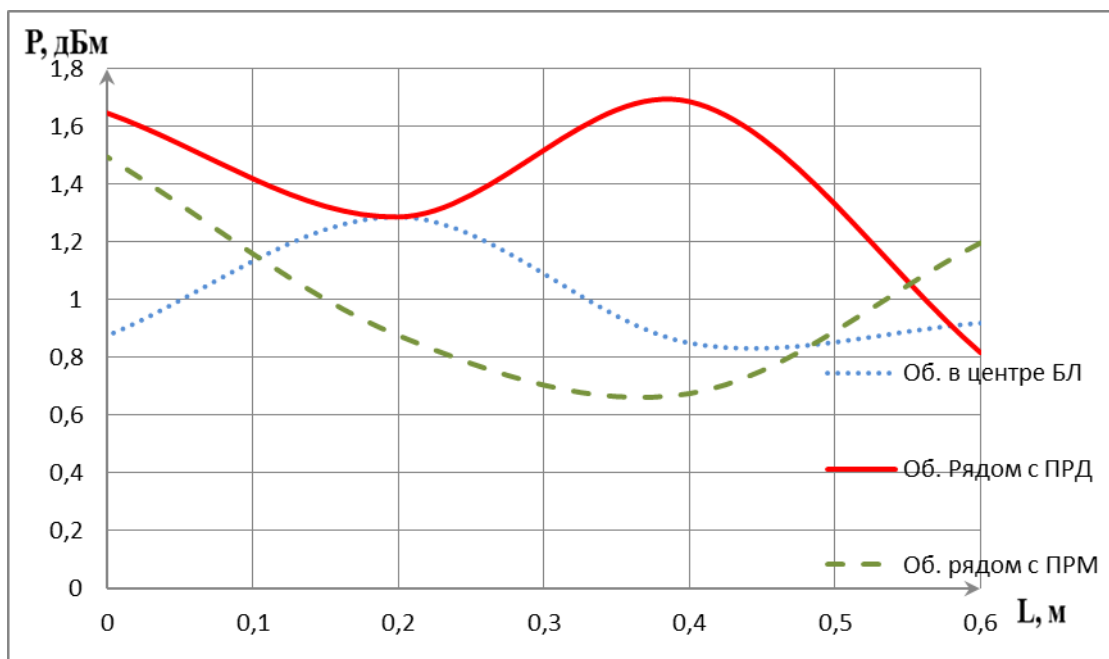


Рисунок 3.12 – Среднеквадратические отклонения от уровня мощности

Из рисунка 3.11 видно, что ширина зоны обнаружения на середине отрезка между передатчиком и приемником шире, чем возле передатчика и приемника. Это объясняется зоной обнаружения в виде эллипсоида вращения.

### 3.3 Выводы

Экспериментальные исследования установили:

1) Подтверждается количественное влияние местности и времени года на уровень мощности принимаемого сигнала:

- для стадиона наименьшие потери получены в июле месяце, где уровень сигнала составлял  $-42,5$  дБм при разнесении на расстояние 20 м, в июне -  $-48,8$  дБм;

- для степи наименьшие потери получены в июле месяце, где уровень сигнала составлял  $-47,6$  дБм при разнесении на расстояние 20 м, в мае -  $-56,7$  дБм.

2) Объект оказывает воздействие на уровень мощности приемного сигнала в зависимости от расстояния до БЛ:

- при отклонении объекта от БЛ на расстояние 0,2 м ослабление сигнала составляет  $-4,5$  дБм;

- при отклонении объекта от БЛ на расстояние свыше нулевой зоны Френеля, равной 0,46 метра (для  $f=2,4$  ГГц) информация приближается к пороговому уровню  $-42,5$  дБм.

- чувствительность зоны обнаружения вблизи передатчика и приемника резко увеличивается.



## **4 Моделирование распространения радиосигнала вблизи базовой линии БРЛС**

Ранее отмечалось, что многопозиционная радиолокация, единичным звеном которой является бистатическая РЛС, является перспективным направлением развития радиолокации в целом. Также было отмечено, что определение местоположения цели в бистатических РЛС основано на измерениях доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала. Были отмечены существенные недостатки эффекта Доплера, заключающиеся в не проявлении эффекта вблизи базовой линии и при неподвижных (малоподвижных) целях (например, вертолета). Таким образом, у бистатической радиолокации, основанной на эффекте Доплера, есть существенные недостатки, одним из которых является наличие нечувствительной зоны вдоль базовой линии.

Ввиду вышесказанного, в данной работе было предложено оценить влияние объекта вблизи базовой линии на мощность приемного сигнала. Для чего был проведен эксперимент, описанный в третьей главе. Полученные экспериментальные результаты позволяют разработать модель РЛС, местоположение объекта в которой определяется по измерениям уровня мощности приемного сигнала без использования доплеровского эффекта. При успешной разработки математической модели, основанной на мощности приемного сигнала, в дальнейшем позволит дополнить существующие БРЛС дополнительным параметром и тем самым повысить точность определения местоположения цели.

### **4.1 Моделирование зоны обнаружения БРЛС**

Исходя из результатов эксперимента, описанных в предыдущей главе, о влиянии объекта на уровень мощности принимаемого сигнала вблизи базовой линии, смоделируем зону обнаружения (ЗО) бистатической РЛС, образованной на основе измерения уровня мощности приемного сигнала.

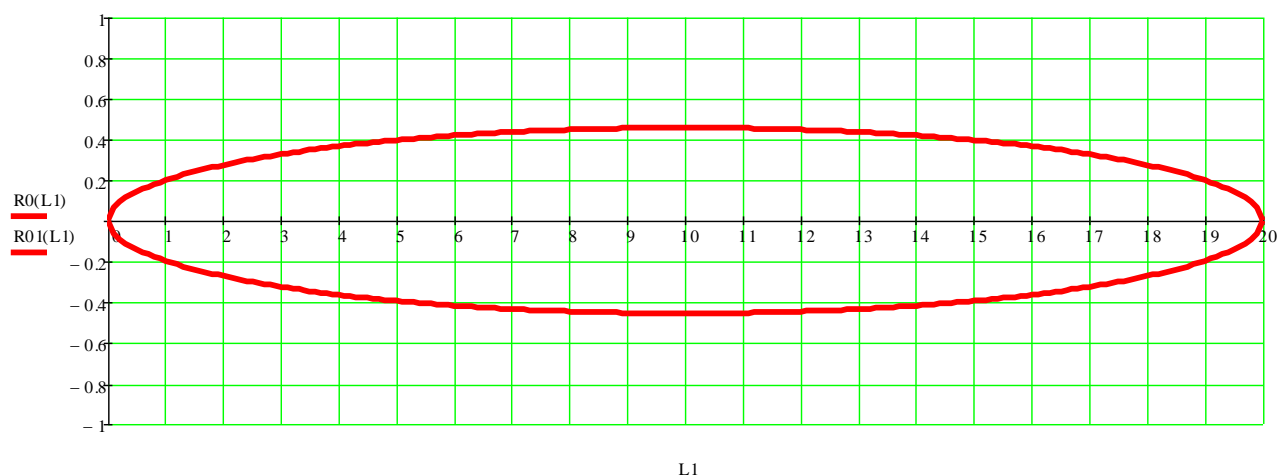
Итак, эксперименты показали о существенном влиянии объекта на уровень мощности приемного сигнала, находящегося вблизи базовой линии между передатчиком и приемником в радиусе нулевой зоны Френеля. При удалении объекта от базовой линии на расстояние более радиуса нулевой зоны Френеля – влияние на уровень мощности приемного сигнала не значительное. Таким образом, зону обнаружения бистатической РЛС, основанной на измерении уровня мощности сигнала на приемной стороне, можно представить как вытянутый эллипсоид вращения, радиус которого изменяется в зависимости от расстояния сечения между передатчиком и приемником.

Для определения радиуса ЗО в любой точке от передатчика к приемнику, воспользуемся формулой нулевой зоны Френеля:

$$R_0 = \sqrt{L1 \cdot L2 \cdot \lambda / 3 \cdot (L1 + L2)} \quad (4.1)$$

где  $R_0$  – радиус нулевой зоны Френеля, м;  
 $L1$  – расстояние от ПРД до сечения, м;  
 $L2$  – расстояние от сечения до ПРМ, м;  
 $\lambda$  – длина волны, м.

Формула (4.1) показывает форму зоны обнаружения, образуемую между передатчиком и приемником. С помощью программного обеспечения MathCad (Приложение А) была рассчитана зона обнаружения БРЛС, с параметрами предыдущего эксперимента. На рисунке 4.1 показана форма ЗО в соответствии с расчетом.



$L1$  – расстояние от ПРД до точки наблюдения (м),  $R0(L1)$  – радиус ЗО в точке равной  $L1$ (м).

Рисунок 4.1 – Форма ЗО в соответствии с формулой (4.1)

#### 4.1.1 Вывод

Таким образом, по формуле 4.1 была смоделирована зона обнаружения бистатической РЛС, основанной на измерении уровня мощности приемного сигнала. Зона обнаружения представляет вытянутый эллипсоид вращения с радиусом, равным нулевой зоне Френеля. Однако измерение только уровня мощности сигнала не позволяет определить точное местоположение объекта. По отклонению уровня мощности приемного сигнала возможно только фиксировать факт приближения, пересечения целью базовой линии в бистатической РЛС. Поэтому для более точного определения местоположения объекта в работе предлагается увеличить количество базовых линий, т.е. перейти от бистатической к многопозиционной модели.

## 4.2 Моделирование многопозиционной РЛС

### 4.2.1 Разработка элементов РЛС

Разрабатываемая модель многопозиционной РЛС предполагает работать на основе измерения уровня мощности приемного сигнала. Так как зона обнаружения бистатической модели определяется нулевой зоной Френеля и при пересечении объектом базовой линии позволяет лишь фиксировать факт пересечения без определения точных координат, то разрабатываемая многопозиционная модель позволит определять местоположение объекта в двух координатах.

На рисунке 4.2 представлена двухкоординатная многопозиционная радиолокационная система, состоящая из пяти передатчиков и пяти приемников. Контролируемая зона формируется передающей (ПРД) и приемной (ПРМ) антенными устройствами, установленными на передающей и приемной позициях, включающая излучение гармонического сигнала и обработку сигнала приемника, фиксируя величины набора первичных параметров сигнала, характеризующих появление нарушителя на линии базы (БЛ) (отрезок пространства между передатчиком и приемником), при отклонении этих параметров от порогового значения.

В контролируемую зону включают дополнительно на передающей и приемной позициях, разнесенные в пространстве на фиксированное расстояние друг от друга передатчики, частоты которых смещены между собой, для обеспечения их одновременной работы. Приемники с разнесенными частотами  $f$ , формируют в пространстве пять базовых линий (БЛ) с использованием передатчиков и приемников, три из которых формируют параллельными между собой и ортогональными возможному перемещению объекта, а две линии базы формируют от передатчиков под углом к одной из параллельных базовых линий (диагональ виртуального прямоугольника).

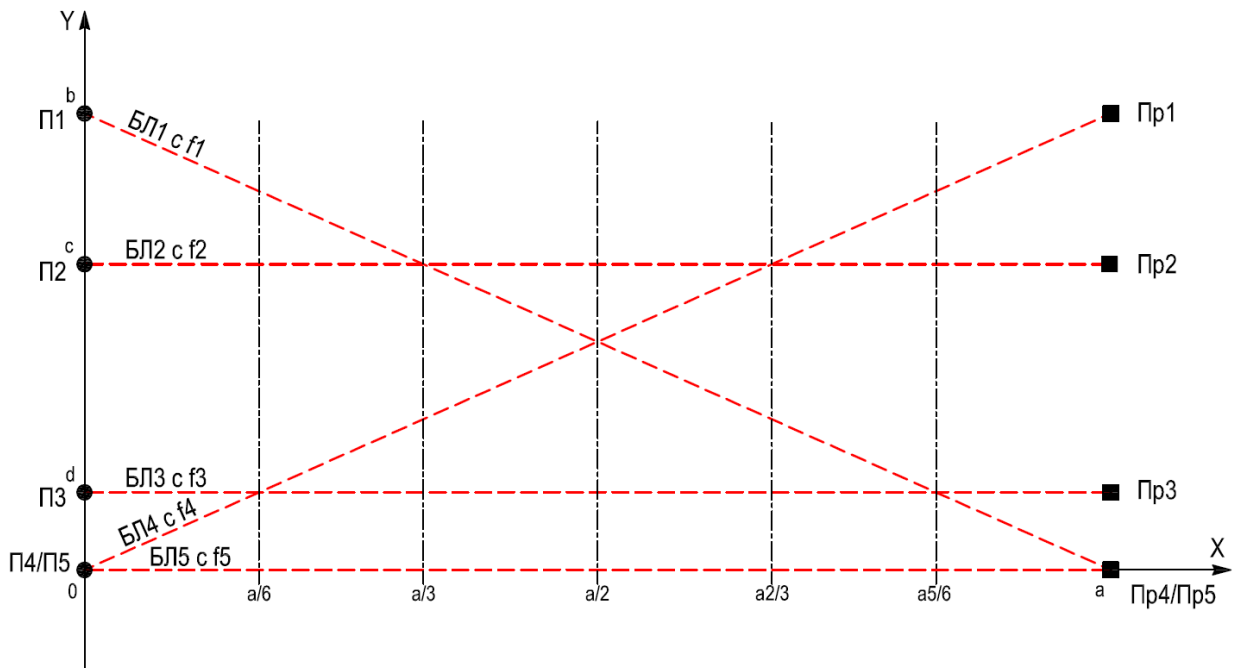


Рисунок 4.2 – Схема организации многопозиционной РЛС (б/м)

Базовые линии образуются монохроматическим сигналом, в нулевой зоне Френеля (с радиусов  $R_0$ ), по методу на «просвет». Поэтому контролируемая зона разбивается на отдельные составляющие (зоны обнаружения БРЛС), которые в совокупности представляют систему, позволяющая определять место пересечения объектом контролируемой зоны. На рисунке 4.3 представлена схема организации системы, разделенная на отдельные составляющие.

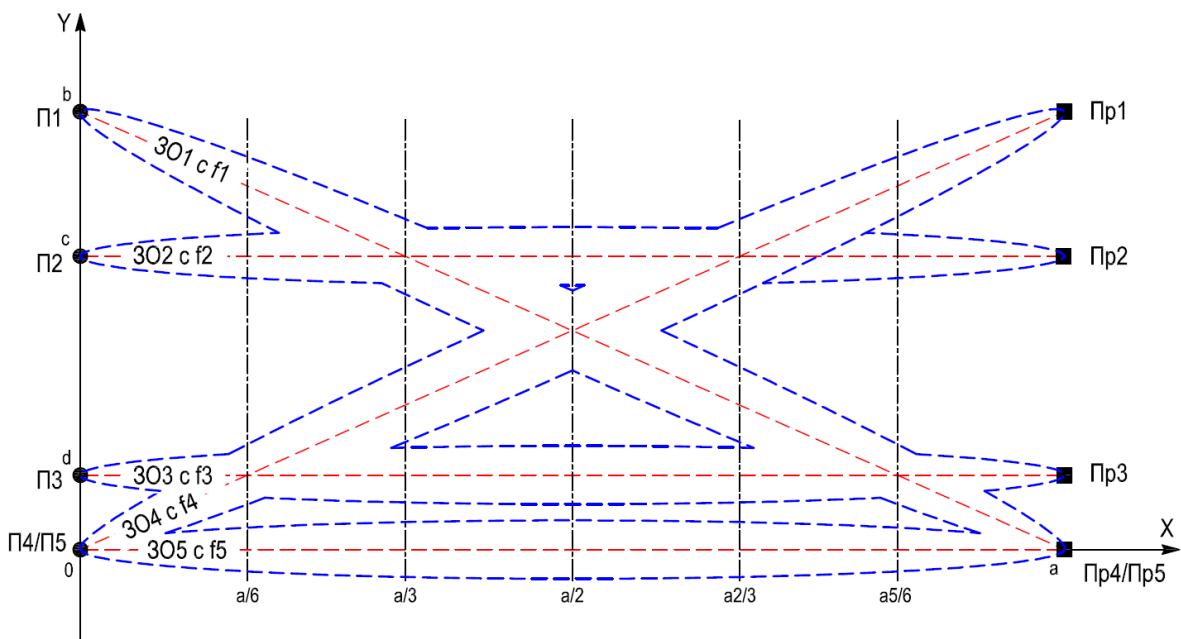


Рисунок 4.3 – Образование контролируемой зоны системы (б/м)

Как видно из рисунка 4.3, расстояние между двумя параллельными базовыми линиями (БЛ3 и БЛ5) равно сумме максимальных радиусов соответствующих зон обнаружения. А так как ЗО представляет собой эллипсоид вращения, ограниченный нулевой зоной Френеля, то радиус ЗО равен радиусу нулевой зоны Френеля на середине разнесения передатчиков и приемников.

#### **4.2.2 Принцип работы системы**

Как уже отмечалось ранее, контролируемая зона состоит из нескольких бистатических базовых линий. При пересечении объектом контролируемой зоны, объект будет последовательно или одновременно (в зависимости от места пересечения) вносить затухания в сигнал на каждой базовой линии. Соответственно, это приведет к отклонению уровня мощности сигнала от порогового на приемной стороне, что говорит о наличии объекта на данной базовой линии. В качестве дополнительного первичного параметра измеряют момент пересечения (t) объектом каждой линии базы. Далее, определяют направление пересечения зоны, определяют разность значений моментов времени пересечения для соседних линий баз, определяют среднюю скорость перемещения объекта между линиями баз, расположенных параллельно. После, определяют значения пути, пройденного объектом между параллельными и диагонально расположенными базами. С использованием значений разности моментов времени и среднего значения скорости между линиями баз, определяют положение объекта относительно приемной или передающей позиции с использованием геометрических соотношений, при известных значениях размеров линии базы и расстояния между передатчиками.

Вследствие узости зоны действия, в просветных системах обычно рассматривают движение цели с постоянной скоростью  $V$  [20]. Более того, в основе расчетов характеристик сигнала и координат лежит модель движения с углами  $\varphi$ , близкими к 90 градусам [20].

##### **4.2.2.1 Объект движется без остановки**

Рассмотрим пересечение контролируемой зоны без остановки объектом, который движется ортогонально параллельным базовым линиям как показано на рисунке 4.4.

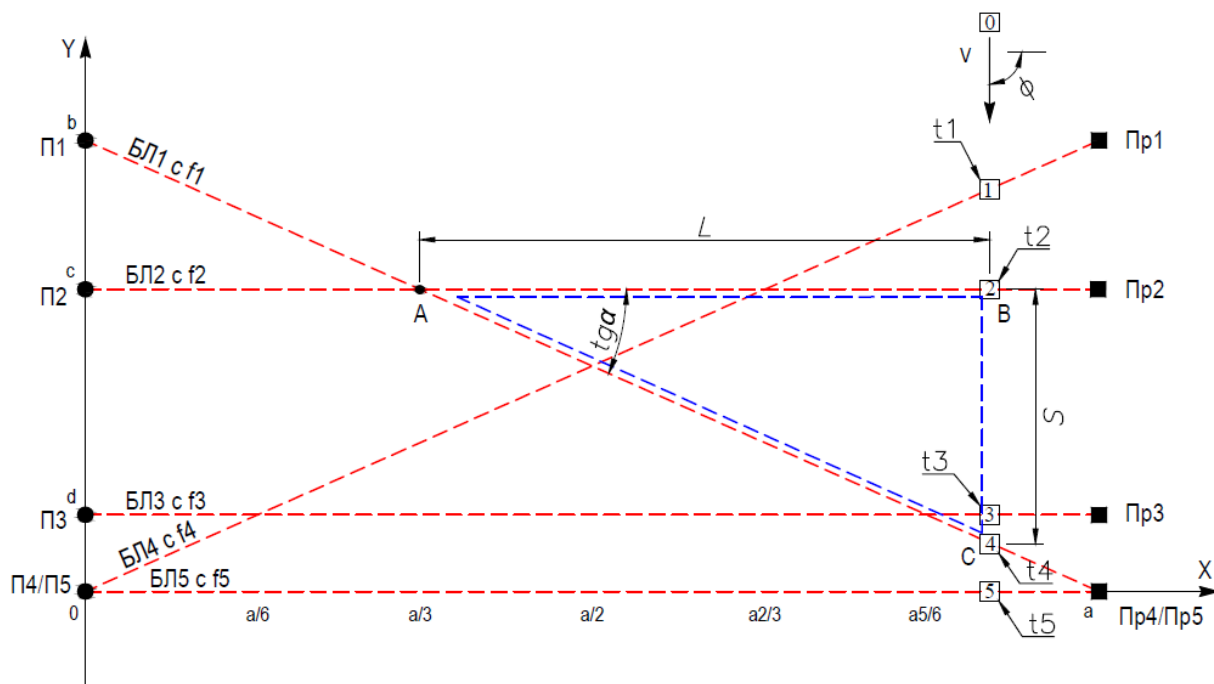


Рисунок 4.4 – Схема организации системы с объектом

- 1) Приемник 1 (Пр1) фиксирует факт пересечения базовой линии 4 (БЛ4) объектом во время  $t_1$ , по отклонению порогового уровня сигнала.  
Следствие: - объект на отрезке БЛ4  $[2/3a, c; a, b]$ , т.к. БЛ4 сработала первой;  
- направление в сторону БЛ5.
- 2) Пр2 фиксирует факт пересечения БЛ2, в момент времени  $t_2$ .  
Следствие: - объект на БЛ2, на отрезке  $[2/3a, c; a, c]$  (следует из первого пункта);  
- подтверждает направление движения в сторону БЛ5.
- 3) Пр3 фиксирует факт пересечения БЛ3, в момент времени  $t_3$ .  
Следствие: - объект на БЛ3, на отрезке  $[5/6a, d; a, d]$  (следует из очередности пересечения базовых линий БЛ1 и БЛ3);  
- подтверждает направление движения в сторону БЛ5;
- 4) Пр4 фиксирует факт пересечения БЛ1, в момент времени  $t_4$ .  
Следствие: - объект на БЛ1, на отрезке  $[5/6a, d; a, 0]$  (следует из предыдущих координат);  
- направление движения в сторону БЛ5;
- 5) Пр5 фиксирует факт пересечения БЛ5, в момент времени  $t_5$ .  
Следствие: - объект на БЛ5, на отрезке  $[5/6a, 0; a, 0]$  (следует из предыдущих координат);

- объект движется со скоростью:

$$V=d/(t_5-t_3) \text{ м/с}; \quad (4.2)$$

где  $d$  – фиксированное расстояние между БЛ3 и БЛ5, м.  
 $t_5$  и  $t_3$  – моменты времени пересечения соответствующей БЛ, с.

Рассмотрим треугольник ABC (см. рисунок 4.4 – синий контур).

Зная равномерную скорость объекта  $V$ , определяем расстояние  $S$ , на которое переместился объект на промежутке времени  $(t_4-t_2)$ :

$$S=V*(t_4-t_2) \text{ м}; \quad (4.3)$$

Учитывая угол гипотенузы прямоугольного треугольника ABC:

$$\operatorname{tg}\alpha=c/(2a/3) - \operatorname{const} \quad (4.4)$$

определяем координаты пересечения объектом БЛ2.

Координатой по оси OX является катет  $L$  прямоугольного треугольника ABC:

$$L=S/\operatorname{tg}\alpha \quad (4.5)$$

Таким образом, объект пересек БЛ2 в точке  $[a/3+L,c]$ , БЛ3 -  $[a/3+L,d]$ , БЛ1 -  $[a/3+L,c-S]$ , БЛ5 -  $[a/3+L,0]$ .

Подобным образом, происходит определение координат при пересечении объектом зоны в другом месте.

В случае одновременного срабатывания двух приемников (Пр1 и Пр4), говорит о пересечении объектом контролируемой зоны посередине.

Подобный сценарий может быть применен при условии, что объект будет двигаться равномерно, либо равноускорено на всем промежутке пересечения контролируемой зоны.

#### **4.2.2.2 Объект движется с остановкой**

Выше был рассмотрен сценарий, когда объект движется без остановок. Однако, если объект остановится между БЛ, так что не будет оказывать влияния на параметр сигнала (см. рисунок 4.5) и потом продолжит свое движение, то в зависимости от того как долго он находился в состоянии покоя, будет зависеть и погрешность в определении скорости, а далее и координат.

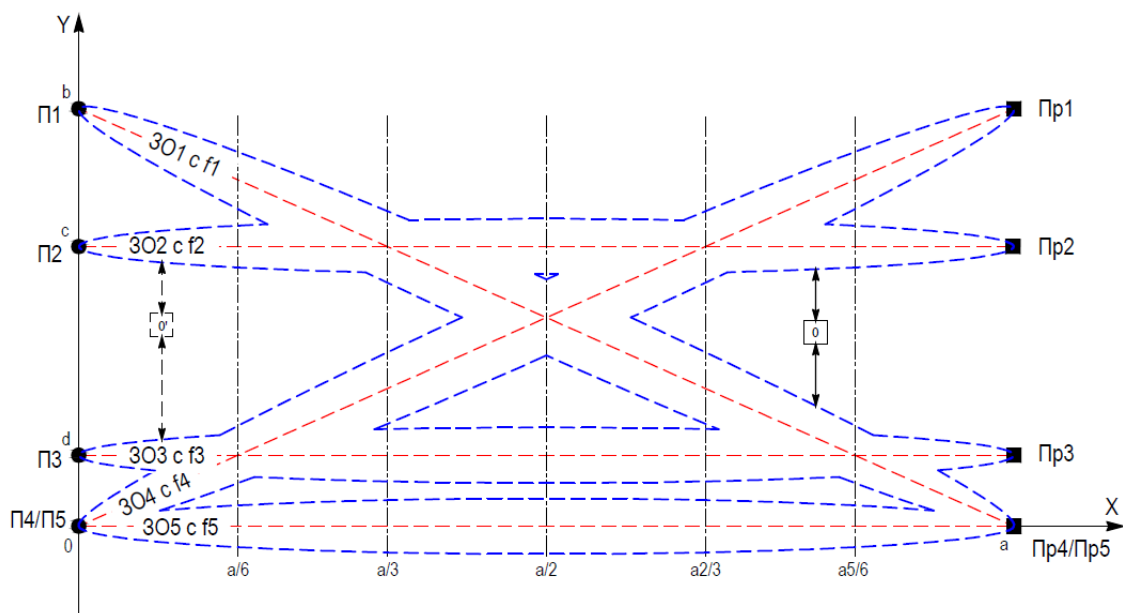


Рисунок 4.5 – Схема организации системы с неподвижным объектом

Именно для определения координат пересечения контролируемой зоны при движении объекта с остановками в системе БЛ3 и БЛ5 расположены близко друг к другу. Близкое расстояние параллельных базовых линий позволяет определить истинную скорость движения объекта, т.к. вероятность остановки объекта на данном отрезке минимальна, а при использовании данной системы для воздушных объектов и вовсе практически отсутствует.

Знание истинной скорости объекта позволяет определить характер движения объекта, т.е. с остановками или без остановок в контролируемой зоне. Если объект движется без остановок, то определение координат происходит по выше описанному алгоритму. Если же объект пересекает контролируемую зону с остановками, то по очередности пересечения базовых линий определяется и зона пересечения (диапазон расстояний, в пределах которого двигался объект) КЗ.

Рассмотрим пример, где объект пересекает КЗ с остановкой.

Фиксация нарушителя происходит подобно тому, как описывалось в предыдущем примере, только в 5 пункте после нахождения истинной скорости  $V$ , сравнивают по времени прохождения расстояния между двумя параллельными базовыми линиями БЛ2 и БЛ3. Вычисляется путь  $S$ , пройденный за отрезок времени  $t_3 - t_2$ :

$$S = V * (t_3 - t_2) \text{ м/с}; \quad (4.6)$$

где  $V$  – скорость движения объекта, м/с.

$T_3$  и  $t_2$  – моменты времени пересечения соответствующей БЛ, с.

Если рассчитанный путь  $S$  окажется больше истинного расстояния между базовыми линиями ( $S > cd$ ), то объект пересек КЗ с остановками и,



следовательно, система определяет диапазон координат пересечения объектом КЗ (см. рисунок 4.5). Иначе, объект двигался без остановок и система определяет точные координаты, по описанному выше алгоритму.

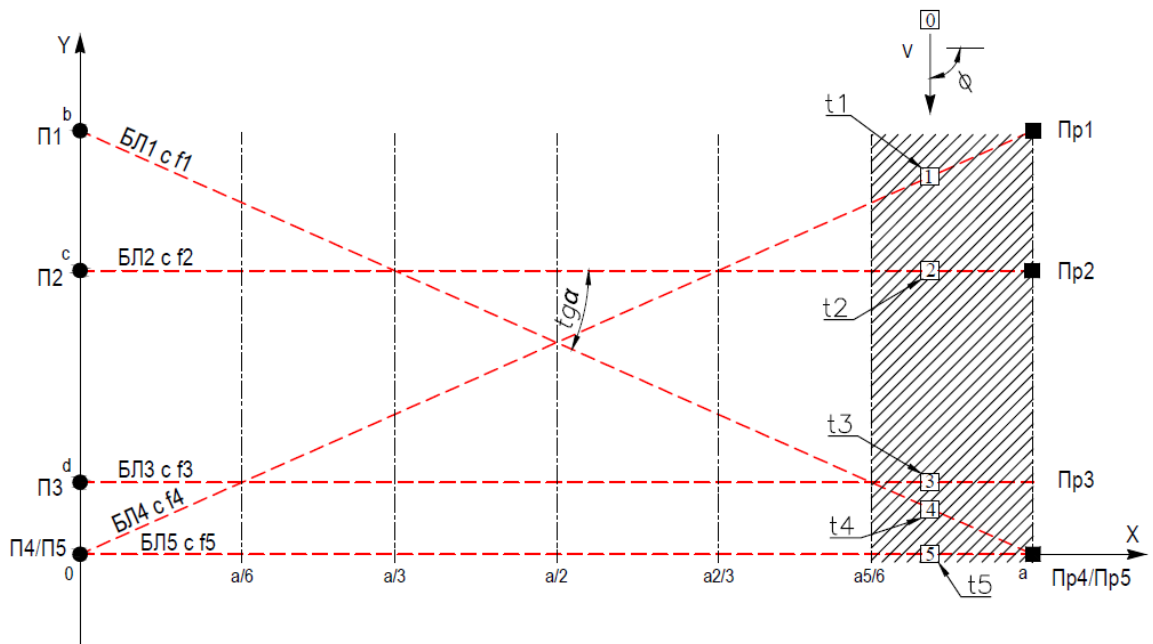


Рисунок 4.5 – Определение диапазона координат системой

### 4.2.3 Результаты моделирования

На рисунке 4.6 представлен результат моделирования (Приложение А) пересечения объектом (синяя линия) контролируемой зоны (КЗ) (30 представлено красными пунктирными линиями). Объект движется со скоростью 1 м/с (вдоль оси ординаты), на расстоянии 40 метров от передатчиков (ось абсциссы).

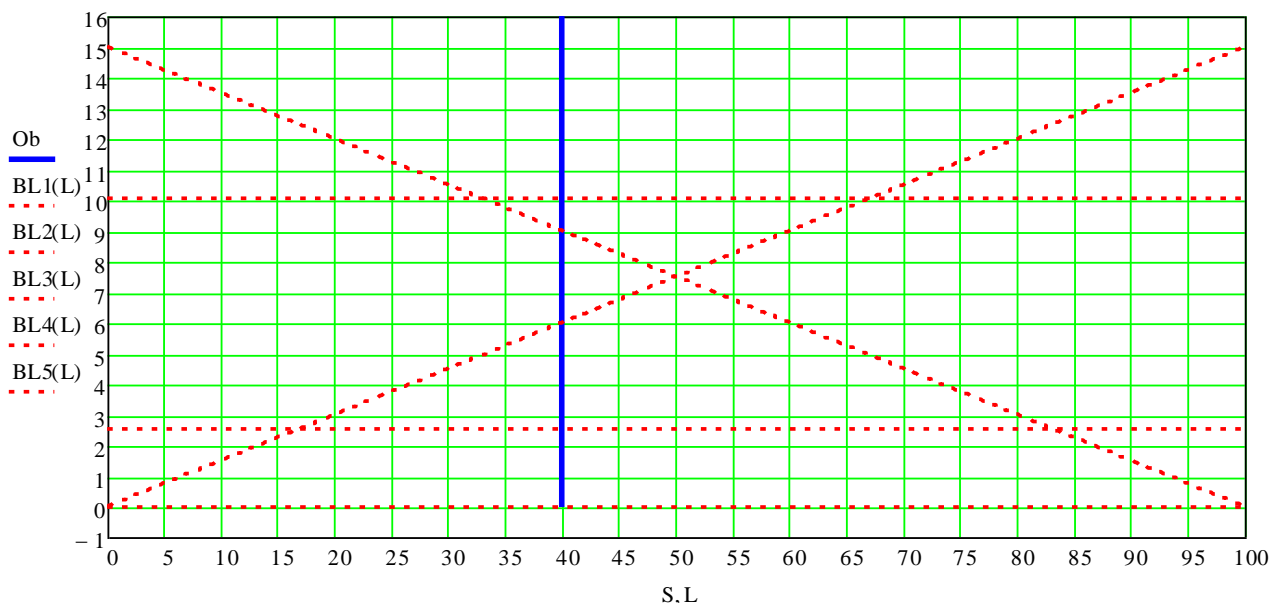


Рисунок 4.6 – Моделирование пересечения объектом КЗ

На рисунке 4.7 представлен результат моделирования (Приложение А) по определению координат пересечения объектом КЗ. На рисунке представлена модель, когда объект передвигается по КЗ без остановок.

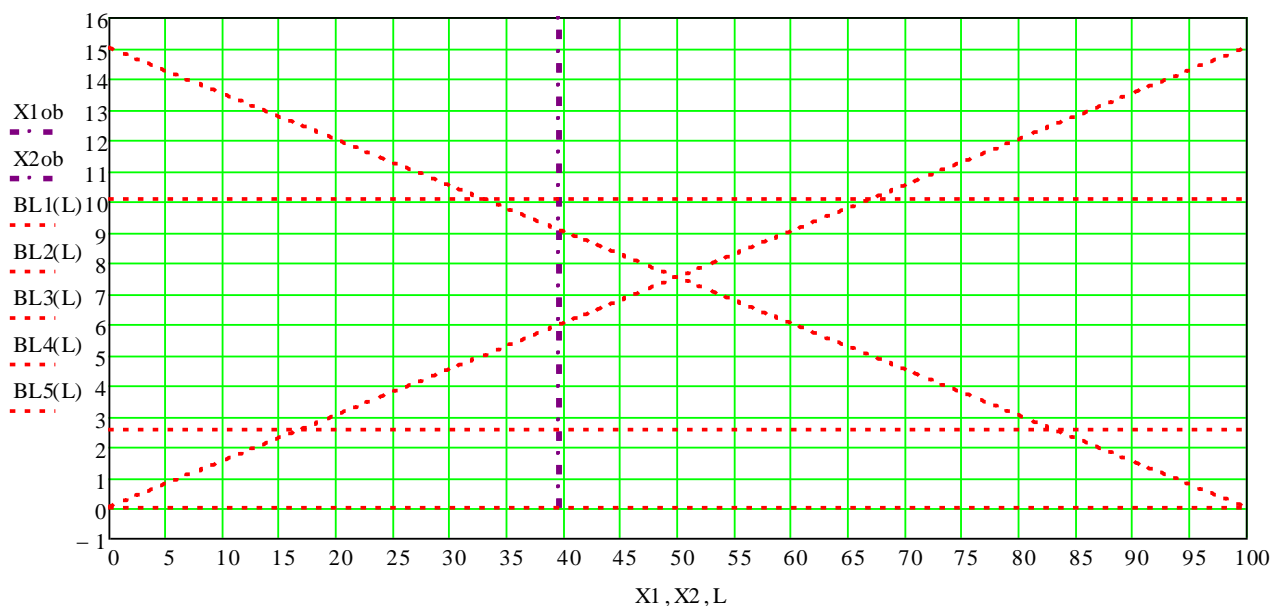


Рисунок 4.7 – Моделирование определения пересечения объектом КЗ без остановки

Из рисунка 4.7 видно, что координаты пересечения объектом (на рисунке представлены фиолетовой штрих пунктирной линией) контролируемой зоны без остановки определены точно.

На рисунке 4.8 представлен результат моделирования (Приложение А), когда объект по тем или иным причинам делал остановку в контролируемой зоне между БЛ2 и БЛ3.

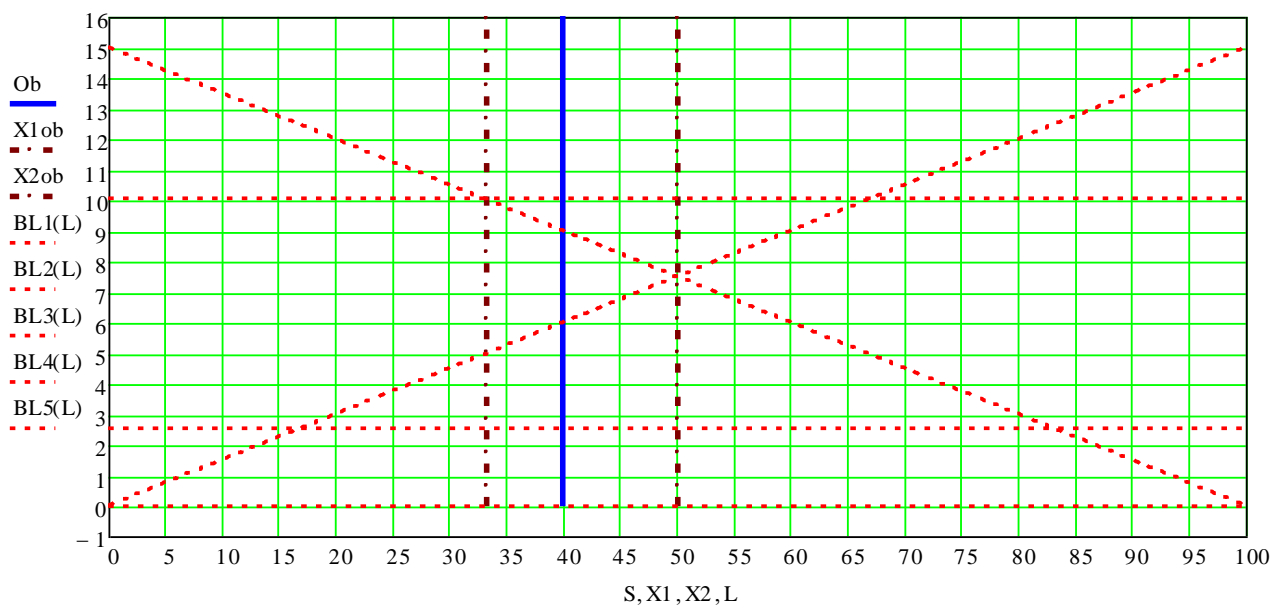


Рисунок 4.8 – Моделирование определения пересечения объектом КЗ с остановкой между БЛ2 и БЛ3

На рисунке 4.8 синей линией показано движение объекта через КЗ. Ввиду того, что объект делал остановки между БЛ 2 и БЛ 3 при пересечении КЗ, система смогла определить лишь участок пересечения объектом контролируемой зоны. Из рисунка следует, что объект пересек КЗ в диапазоне значений по абсциссе от 33,3 до 50 метров.

Однако, в реальности объект может производить остановку не только между БЛ2 и БЛ3, но и между БЛ5 и БЛ3, а также объект может двигаться с ускорением.

На рисунке 4.9 представлен результат моделирования (Приложение А), когда объект по тем или иным причинам делал остановку в контролируемой зоне между БЛ3 и БЛ5.

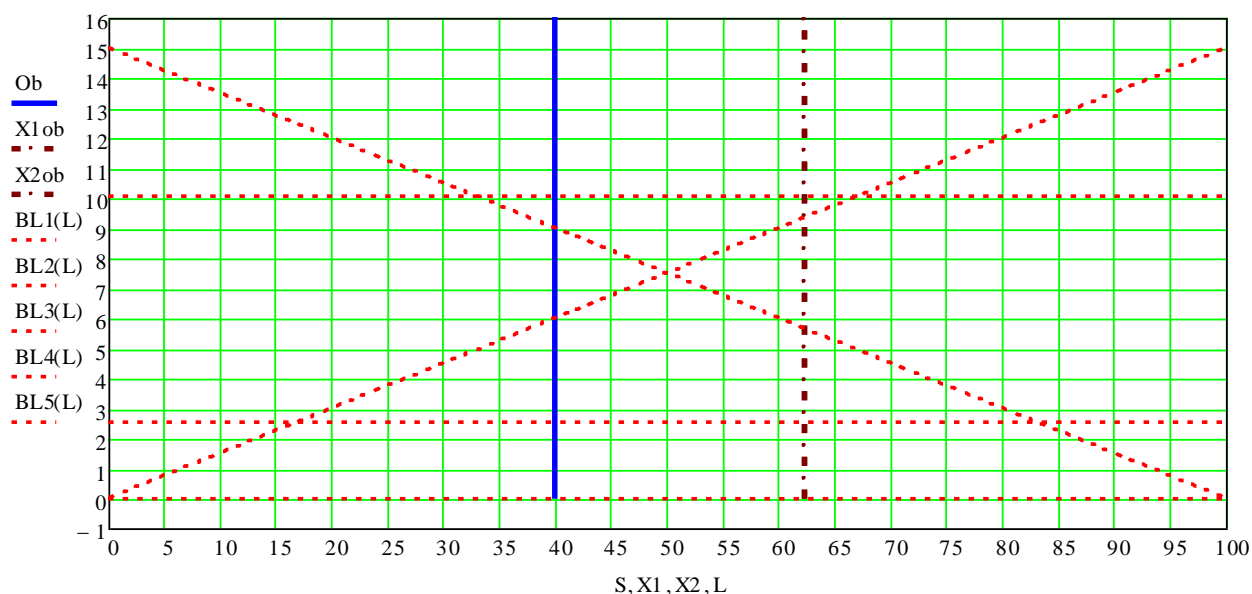


Рисунок 4.9 – Моделирование определения пересечения объектом КЗ с остановкой между БЛ3 и БЛ5

Из рисунка 4.9 видно, что при остановке объекта между БЛ3 и БЛ5 на 13 секунд ошибка определения координат пересечения объекта КЗ составляет 22,5 м (на рисунке синей линией показаны реальные координаты пересечения объектом КЗ, а фиолетовой штрих пунктирной линией – высчитанные координаты). Соответственно при остановке на большее время, ошибка будет также увеличиваться. Также ошибки будут наблюдаться и при движении объекта с ускорением, причем ошибка может быть в больших пределах.

Таким образом, для использования системы в реальных условиях, необходимо перейти к секторному определению координат объекта, в котором ошибка составляет  $\pm 8,5$  метра (т.к. объекту присваивается середина сечения) при разнесении передатчиков и приемников на 100 м.

### **4.3 Выводы**

Разработан и исследован вариант многопозиционной модели радиолокационной системы, состоящей из элементов бистатических РЛС.

Моделирование производилось для двух случаев, когда объект пересекает контролируемую зону с остановками и без, но с изменением скорости движения. Установлено, что при движении объекта с равномерной скоростью, система позволяет точно определить координаты пересечения объектом КЗ. Однако, любое изменение скорости или остановка объекта между базами, в которых определяют скорость движения цели, приводит к ошибкам. Установлено, что при секторном определении координат пересечения объектом контролируемой зоны удается и определить положение цели и наличие остановок объекта при его движении. При этом ошибка составляет  $\pm 8,5$  метра при разнесении передатчиков и приемников на расстояние равное 100 м при любых длительностях остановок объекта.

### **5 Техническая реализация. Описание изобретения**

По проведенным исследованиям в диссертации предложен способ определения координаты нарушителя в контролируемой зоне. Изобретение относится к радиолокации, в частности к способам контроля наличия наземных объектов в охраняемой зоне. Изобретение может быть использовано в системах охранной сигнализации на участках контроля периметра особо охраняемой зоны важных стратегических объектов, водозаборов, хранилищ и др. объектов при необходимости определения места вторжения.

Для охраны периметра широко используются двухпозиционные радиолучевые системы. Такие системы состоят из передатчика и приемника СВЧ-сигналов. Между передатчиком и приемником формируется чувствительная зона с поперечным сечением до нескольких метров. Системы охраны периметра зоны определяют только факт пересечения нарушителем чувствительной зоны при изменении сигнала мощности в приемнике, но такие системы не позволяют определить координату объекта. Обычно протяженность пролета зоны охраны периметра составляет до нескольких сотен метров. Поэтому для таких расстояний определение места вторжения позволило бы существенно повысить эффективность охранной системы.

Простейший способ определения координат объекта при пересечении объектом линии базы (прямая линия между передатчиком и приемником) – это уменьшение размеров протяженности отдельного звена пролета до величины желаемой точности определения места вторжения и увеличение числа таких звеньев. В такой системе не увеличивается надежность определения наличия объектов, но возрастает число установленного дополнительного оборудования.

Известны способы определения координат объекта, которые предусматривают использование одного передатчика и двух приемников. Такая система предусматривает формирование виртуального треугольника, в которой положение объекта относительно передатчика определяют по моментам времени пересечения двух сторон треугольника при известной постоянной скорости перемещения объекта. Однако изменение скорости объекта или его остановка приводит к значительным ошибкам определения координаты объекта.

Известен способ радиолокационного определения параметров движения объекта (патент России №2133480 С1), основанный на приеме в удаленной от источника излучения точке зондирующего сигнала и сигнала вторичного излучения объекта, выделении из них путем детектирования интерференционного сигнала биений, измерении частоты этого сигнала (частота доплера), при измерении частоты интерференционного сигнала одновременно определяют направление прихода интерференционного сигнала и момент времени, когда частота интерференционного сигнала переходит через нуль, после чего по измеренным величинам параметры траектории определяют как координаты точки пересечения линии направления прихода интерференционного сигнала и поверхности положения, определяемой по значениям частоты интерференционного сигнала и момента перехода этой частоты через нуль.

Недостатком способа является то, что диапазон доплеровских частот отраженных от объекта сигнала перекрывается спектром пассивной помехи и возникают значительные ошибки при определении момента времени перехода через нуль частоты интерференционного сигнала, при этом радиолокационное обнаружение медленно движущихся или движущихся с остановками наземных объектов затруднено или невозможно.

Известен способ (Алгоритм определения координат цели в просветной радиолокации с разнесенным приемом, Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н, Труды Нижегородского государственного технического университета №1, 2014). В соответствии с этим способом в просветной двукоординатной многопозиционной радиолокационной системе, состоящей из передатчика и двух приемников установленных на фиксированном расстоянии друг от друга, вычисляют угловые скорости по разности доплеровских частот сигнала, прогнозируют траекторию с оценкой времени пересечения целью отрезков между передатчиком и приемниками и вычисляют координаты движения цели.

Недостатком способа является то, что прогнозирование траектории и определение координат наземного объекта, движущегося с небольшой скоростью или с остановками, когда частота доплера равна нулю, существенно затруднено.

Известно устройство определения параметров движения цели (патент России №2515562С1, опубл.2014г), алгоритм работы которого предусматривает следующие признаки: определяют временной интервал,

пропорциональный разности момента времени, отсчитываемого от момента приема сигнала на первой доплеровской частоте, при его распространении вдоль линии базы (расстояния между передающей и приемной позицией), и формирующего импульс начала отсчета временного интервала, и сигнала, принятого на второй доплеровской частоте при его распространении по пути передающая позиция - цель - приемная позиция, формирующего конец отсчета временного интервала. Затем по измеренному значению азимута объекта относительно приемной позиции  $\beta_R$  и сформированной разности расстояний при известном значении базы определяют дальность объекта относительно приемной позиции.

Недостатком способа является то, что для наземного объекта, движущегося с остановками или с переменной скоростью, определение координат затруднено, и кроме того, для реализации способа необходимо дополнительно измерять азимут положения объекта.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является способ обнаружения и определения координат объекта (Ф.Н.Ковалев Просветные многопозиционные радиолокационные системы на основе измерения доплеровской частоты, Труды Нижегородского государственного технического университета №3, 2011). Способ предусматривает определение координаты объекта в многопозиционной радиолокационной системе, сформированной передатчиками, приемниками и антенными устройствами, установленными на передающей и приемной позициях, а также линиями баз (отрезок пространства между передатчиком и приемником) при этом часть линий баз параллельны между собой, а другие линии баз (диагональные) сформированы от передатчиков под разными углами к одной из параллельных базовых линий, включающий излучение гармонического сигнала и обработку сигнала приемника, при этом частоты передатчиков смещены между собой, включающий фиксацию величин набора первичных параметров сигнала, характеризующих появление объекта на линии базы, а именно: измерение доплеровских частот для всех линий баз, определение момента равенства нулю доплеровских частот, фиксацию наличия объекта в контролируемой зоне и определение его координат при отклонении этих первичных параметров от порогового значения.

Способ позволяет увеличить надежность определения наличия объекта за счет дублирования информации, но при наличии остановок объекта определение координаты объекта затруднено, так как измерение доплеровских частот, определение момента равенства нулю доплеровских частот на линии базы выполняется с существенными ошибками. Кроме того, возникают сложности использования сигнала доплеровских частот при фиксации наземных объектов из-за влияния отражения сигнала от поверхности земли.

Задачей изобретения является разработка способа определения координат объекта радиолокационной системой, позволяющего повысить

эффективность системы за счет определения места вторжения наземного объекта в условиях его движения с остановками через контролируемую зону.

Техническим результатом изобретения является определение координаты места вторжения наземного объекта при его движении с остановками в контролируемой зоне.

Технический результат обеспечивается за счет измерения мощности сигналов на входе приемника при определении моментов времени пересечения базовых линий, увеличения числа пересечения базовых линий, определения координаты объекта в рамках одного из сечений зоны контроля.

Работа предлагаемой радиотехнической системы поясняется схемой, представленной на рисунке 5.1.

На схеме риг.5.1 обозначены:

- П1, П2, П3, П4 – антенные устройства и передатчики передающей позиции,
- Пр1, Пр2, Пр3, Пр4 – приемники приемной позиции,
- 1с, 2с, 3с, 4с, 5с, 6с - сечения контролируемой зоны,
- отрезок «сплошная линия» - базовая линия П1-Пр4,
- отрезок «штрих» - базовая линия П2-Пр2,
- отрезок «пунктир» - базовая линия П3-Пр3,
- отрезок «штрих пунктир» - базовая линия П4-Пр4,
- отрезок «двойная сплошная линия» - базовая линия П4-Пр1,
- «темные точки» – координаты пересечения базовых линий,
- «тройная сплошная линия» - траектория движения объекта,
- «стрелка» - направление движения объекта.

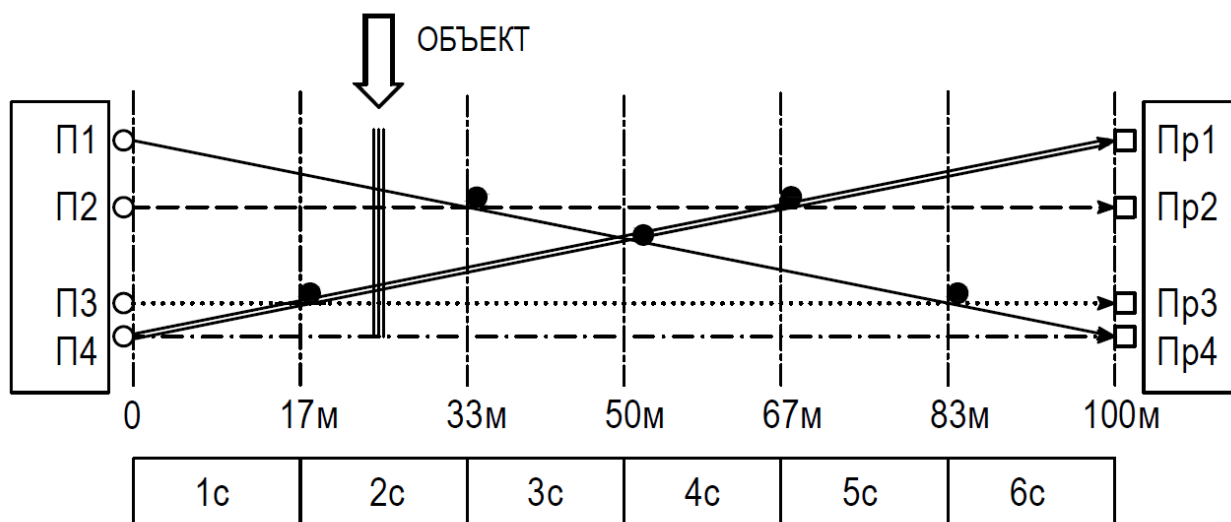


Рисунок 5.1 – Схема организации системы

Предлагаемый способ определения координаты объекта в контролируемой зоне реализуется следующим образом.

Система является многопозиционной и состоит из определенного числа передатчиков и приемников, во время работы, которых образуются каналы (линия базы) передачи электромагнитной энергии - радиолучи. Канал имеет объемную зону обнаружения - вытянутый эллипсоид вращения, диаметр которого зависит от рабочей частоты излучения передатчика и расстояния между передатчиком и приемником. Поперечные размеры зоны обнаружения включают  $m$  зон. Основная доля энергии передается внутри первой зоны Френеля, радиус которой равен  $r_1$ , внутри первой зоны обычно выделяют минимальную зону Френеля  $r_0$ . Экранирование объектом этой зоны Френеля приводит к значительному ослаблению напряженности поля в зависимости от площади перекрытия сигнала. Радиус минимальной зоны Френеля  $r_0$  для середины расстояния между передатчиком и приемником, которые установлены на расстоянии  $L$ , равен:

$$r_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot 0,25 \cdot L}{3}}, \quad (5.1)$$

где  $\lambda$  - длина волны сигнала для частоты  $F$ ,  
 $L$  - длина пролета.

Если нарушитель находится на расстоянии от базовой линии больше, чем радиус  $r_0$ , то на приемной антенне наблюдается практически напряженность поля, соответствующая напряженности сигнала приемника при отсутствии объекта, что характерно для небольшой чувствительности приемника, соответствующей типовым устройствам наземных радиолучевых систем. Когда нарушитель пересекает середину зоны  $r_0$  базовой линии, приемный модуль регистрирует изменения уровня принимаемого сигнала и время  $t_i$  пересечения линии базы. Интенсивность этих изменений зависит от размеров нарушителя. При этом промежуток времени  $t_i$  между двумя пересечениями баз характеризует путь, который проделал объект при пересечении зоны для данной траектории перемещения (при постоянной скорости перемещения). Количество базовых линий системы определяется в зависимости от желаемой ошибки определения координат объекта в контролируемой зоне, а, следовательно, от количества сечений контролируемой зоны. Количество сечений может быть выбрано разным: 2, 4, 6 и т.д. При длине пролета 100м и 4 сечениях ошибка оценки положения объекта составит  $\pm 12,5$ м, при 6 сечениях ошибка оценки положения объекта составит  $\pm 8,5$ м, при двух сечениях ошибка оценки положения объекта составит  $\pm 25$ м.

Пример работы системы в соответствии с предлагаемым способом.

На рис. 5.1 представлена схема контролируемой зоны, разбитая на два сектора и шесть сечений. Ширина контролируемой зоны  $S=10$ м, длина зоны  $L=100$ м.



На передающей позиции зоны установлены в линию четыре передатчика П1, П2, с расстоянием 3,4м между ними и расстоянием 1,7м – между П3, П4. На приемной позиции установлено четыре приемника Пр1, Пр2, Пр3, Пр4 с аналогичными расстоянием между парами. Контролируемая зона включает кроме передатчиков и приемников пять виртуальных линий баз. Расстояние между параллельными линиями баз разное: для баз (П3-Пр3 и П4-Пр4) равно  $R_0=1,7\text{м}$ , а для баз (П2- Пр2 и П4- Пр4) равно  $R_1=6,6\text{м}$ , положение баз занесено в память ЦВМ. Частоты генераторов F1, F2, F3, F4 соответствующих передатчиков разнесены между собой. Значение частоты  $F_1= 24,5$  ГГц. Для частоты F1 значение радиуса нулевой зоны  $r_0=(0,0125*0,25*100/3)^{0,5}=0,32\text{м}$ . Приемник Пр4 фиксирует две частоты: частоту сигнала П1 и П4.

Объект перемещается с постоянной скоростью и остановками. Направление перемещения объекта, скорость, траектория и длительность остановок перемещения объекта не известны до проведения измерений.

Исходные параметры: объект перемещается по траектории 1 со скоростью  $V=1\text{м/с}$ , при этом координата объекта 25м от передатчиков, т.е. объект движется через сечение 2 (между 17м и 34м), длительность остановки объекта составляет 2,5с, направление движения совпадает со стрелкой рис. 5.1.

В соответствии со способом измеряют изменения мощности сигнала приемников. Измеряют моменты пересечения объектом линий баз:  $t_{Пр41}$ ,  $t_{Пр2}$ ,  $t_{Пр1}$ ,  $t_{Пр3}$ ,  $t_{Пр44}$ . Индексы t включают номер приемника, причем приемник 4 измеряет две сдвинутые частоты от разных передатчиков: П1( $t_{Пр41}$ ) и П4( $t_{Пр44}$ ). При этом результаты измерения определяют моменты времени пересечения соответствующих баз с учетом остановки объекта:  $t_{Пр41}=0$ ,  $t_{Пр2}=0,9\text{с}$ ,  $t_{Пр1}=5\text{с}$ ,  $t_{Пр3}=5,8\text{с}$ ,  $t_{Пр44}=7.5+2.5\text{с}=10\text{с}$ .

Определяют направление движения. Первый зафиксированный сигнал пересечения траекторией параллельных линий баз -  $t_{Пр2}$ . Для этого варианта - первая параллельная база (П2-Пр2) , следующая параллельная база (П4-Пр4). При этом  $t_{Пр2} < t_{Пр44}$  , следовательно, направление пересечения совпадает с направлением стрелки (рис. 5.1). Для противоположного направления движения объекта изменяется порядок зафиксированных сигналов. Первый зафиксированный сигнал в этом случае –  $t_{Пр44}$ , при этом  $t_{Пр44} < t_{Пр2}$ .

Определяют сектор движения объекта. Выделяют два сектора, граница между ними определяется моментом пересечения диагональных баз П4-Пр1 и П1-Пр41, т.е. равенством  $t_{(П1,Пр4)}=t_{(П4,Пр1)}$ , при этом: сектор1 располагается до пересечения диагональных баз, сектор 2 – после момента пересечения диагональных баз. В соответствии с рис. 5.1 для данного направления перемещения  $t_{Пр41} < t_{Пр1}$ , т.е. неравенство отрицательное ( $0 < 5\text{с}$ ). Таким образом, объект перемещается в секторе 1 в одном из сечений 1,2 или 3.

Предварительно для разных направлений перемещения объекта, разных секторов положения объекта формируют таблицы логических условий нахождения объекта в границах определенного сечения.

Для данного примера и выбранного направления движения необходимы две таблицы.

Таблица 5.1 - Границы логических условий сечений для сектора 1.

а) Для траектории объекта в границах сечения 1 (рис. 5.1) должны выполняться неравенства  $t_{\text{Пр41}} < t_{\text{Пр2}}$  и  $t_{\text{Пр3}} < t_{\text{Пр1}}$ .

в) Для траектории объекта в границах сечения 2 (рис. 5.1) должны выполняться неравенства  $t_{\text{Пр41}} < t_{\text{Пр2}}$  и  $t_{\text{Пр3}} > t_{\text{Пр1}}$ .

с) Для траектории объекта в границах сечения 3 (рис. 5.1) должны выполняться неравенства  $t_{\text{Пр41}} > t_{\text{Пр2}}$  и  $t_{\text{Пр3}} > t_{\text{Пр1}}$ .

Таблица 5.2 - Границы сечений логических условий для сектора 2.

а) Для траектории объекта в границах сечения 4 (рис. 5.1) должны выполняться неравенства  $t_{\text{Пр1}} > t_{\text{Пр2}}$  и  $t_{\text{Пр3}} > t_{\text{Пр41}}$ .

в) Для траектории объекта в границах сечения 5 (рис. 5.1) должны выполняться неравенства  $t_{\text{Пр1}} < t_{\text{Пр2}}$  и  $t_{\text{Пр3}} > t_{\text{Пр41}}$ .

с) Для траектории объекта в границах сечения 6 (рис. 5.1) должны выполняться неравенства  $t_{\text{Пр1}} < t_{\text{Пр2}}$  и  $t_{\text{Пр3}} < t_{\text{Пр41}}$ .

Для фиксации положения объекта в одном из сечений зоны необходимо и достаточно выполнение двух условий, представленных в таблицах для зафиксированного сектора движения объекта.

Для определения сечения траектории движения объекта в секторе 1 сравнивают последовательно результаты измерений ( $t_{\text{Пр41}}=0$ ,  $t_{\text{Пр2}}=0,9\text{с}$ ,  $t_{\text{Пр1}}=5\text{с}$ ,  $t_{\text{Пр3}}=5,8\text{с}$ ,  $t_{\text{Пр44}}=7,5\text{с}+2,5\text{с}=10\text{с}$ ) с условиями таблицы 1 и определяют выполнение требуемых неравенств для разных сечений:

а) фактические результаты измерений траектории в сечении 1 соответствуют условиям только для первого условия  $0 < 0,9\text{с}$ , второе условие не выполняется, так как  $5,8\text{с}$  больше  $5\text{с}$ .

в) фактические результаты измерений траектории в сечении 2 выполняются для всех условий: первое условие выполняется  $0 < 0,9\text{с}$ , второе условие выполняется, так как  $5,8\text{с}$  больше  $5\text{с}$ .

с) фактические результаты измерений траектории в сечении 3 соответствуют только для одного условия. Первое условие не выполняется, так как  $0 < 0,9\text{с}$ , второе условие выполняется, так как  $5,8\text{с}$  больше  $5\text{с}$ .

Таким образом, требуемые условия выполняются только для сечения 2, т.е. способ позволяет определить координату объекта. Принимая за координату объекта середину сечения 2 равную  $25\text{м}$ , получаем, что для данной траектории ошибка определения равна нулю. Для других траекторий в сечении 2 максимальная ошибка не превышает  $\pm 8,5\text{м}$ . Такая же величина максимальной ошибки справедлива для других сечений и любой длительности остановки объекта.

Реализовать способ обнаружения координат объекта можно при использовании разработок, на основе которых реализованы действующие

системы обнаружения наземных объектов. Например, извещатель Радий-2 (использует частоту 9,5 ГГц), извещатель РМ 24-800 (использует частоту - 24,5 ГГц), извещатель Тантал-200 (использует частоту 24ГГц). Логические устройства, принимающие решения относительно сигналов определяющих направления движения объекта, определения сектора и сечения в контролируемой зоне, могут быть реализованы с использованием типовых устройств электроники.

Таким образом, предлагаемый способ определения координаты объекта в контролируемой зоне предоставляет возможность повысить эффективность и достоверность сигналов фиксации объекта. Повышение эффективности системы при движении наземного объекта с остановками достигается за счет того, что способ позволяет формировать положения баз в зависимости от требуемого количества виртуальных сечений, т.е. желаемой точности системы и отказаться от измерения доплеровской частоты сигнала. Повышение достоверности сигналов достигается за счет возможного многократного дублирования информации.

## 5.1 Формула изобретения

1. Способ определения координат объекта в многопозиционной радиолокационной системе, сформированной передатчиками, приемниками и антенными устройствами, установленными на передающей и приемной позициях, а также линиями баз (отрезок пространства между передатчиком и приемником) при этом часть линий баз параллельны между собой, а другие линии базы (диагональные) сформированы от передатчиков под разными углами к одной из параллельных базовых линий, включающий излучение гармонического сигнала и обработку сигнала приемника, частоты передатчиков смещены между собой, включающий фиксацию величины набора первичных параметров сигнала, характеризующих появление объекта на линии базы, фиксацию наличия объекта в контролируемой зоне и определение его координат при отклонении этих параметров от порогового значения, отличающийся тем, что в контролируемой зоне, для параллельных линий баз устанавливаются неравные расстояния  $R1$  и  $R0$  между базами, в качестве дополнительных первичных параметров измеряют мощность сигнала  $P_i$  приемников, оценивают изменение мощности  $P_i$  на входе приемника и фиксируют моменты времени  $t_i(t1,t2,t3,t4,t5)$  последовательного пересечения нарушителем каждой линии базы с использованием значений максимального изменения мощности  $P_i$ , определяют направление пересечения зоны объектом в зависимости от от первого момента приема сигнала пересечения параллельных баз, определяют промежутки времени  $\tau_i$  ( $\tau1, \tau2, \tau3, \tau4$ ) между значениями  $t_i$  для соседних линий баз, определяют скорость  $V$  перемещения нарушителя на участке  $R0$  меньшей величины, определяют наличие остановок объекта на участке  $R1$ , определяют координаты объекта для случая отсутствия остановок объекта с использованием расстояния  $N_i$

траектории между двумя диагональными базами, и геометрических соотношений для линий баз.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что скорость  $V$  на участке  $R_0$  определяют с использованием значения расстояния  $R$  и времени  $\tau$  пересечения объектом этого участка.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что наличие остановок объекта на участке  $R$  определяют, сравнивая фактическое значения  $R$  и расстояние  $R$ , полученное с использованием  $V$  и длительности пересечения этого участка  $\tau$ .

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что расстояние  $H_i$  отрезка траектории между двумя диагональными базами определяют с использованием скорости  $V$  и времени  $t_i$  пересечения этих баз, в границах расстояния  $R$ .

## Заключение

Установлено, что наряду с преимуществами бистатических радиолокационных станций при определении координаты цели, имеются большие сложности и недостатки: необходимость синхронизации двух разнесенных устройств, бистатическая РЛС формально не позволяет отслеживать траекторию движения цели до пересечения ею линии базы из-за трудностей измерения частоты Доплера, возникают существенные ошибки при переменной скорости объекта и остановках объекта.

Установлено, что применение находит многопозиционная радиолокация, основанная на бистатической РЛС, например, в системах управления воздушным движением (УВД), в противовоздушной и противоракетной обороне (ПВО и ПРО), для наблюдения наземных объектов, космических объектов.

Экспериментальные исследования на физической модели влияния положения объекта вблизи базовой линии на уровень изменения мощности сигнала приемника установили, что:

- характеристики местности и времени года оказывают существенное влияние на уровень мощности принимаемого сигнала;
- характеристики изменения мощности сигнала достаточны для определения наличия объекта при его отклонении от линии базы в радиусе нулевой зоны Френеля.

Разработан и исследован вариант многопозиционной математической модели радиолокационной системы, состоящей из элементов бистатических РЛС. Результаты моделирования показали:

- при движении объекта с равномерной скоростью, система позволяет точно определить координаты пересечения объектом зоны контроля. Однако, любое изменение скорости или остановка объекта между базами, в которых определяют скорость движения цели, приводит к ошибкам.
- при секторном определении координат пересечения объектом контролируемой зоны удается, и определить положение цели и наличие остановок объекта при его движении, при этом ошибка составляет  $\pm 8,5$  метра при разнесении передатчиков и приемников на расстояние равное 100 м для любых длительностей остановок объекта.

Разработан новый способ определения координаты объекта, подана Заявка на изобретение в экспертную организацию Республики Казахстан (№ 2015/ от 20.01.2015).

## Перечень сокращений

РЛС – радиолокационная станция;  
СШП – сверхширокополосный;  
ЭПР – эффективная площадь рассеяния;  
БРЛС – бистатическая РЛС;  
МПРЛС – многопозиционная РЛС;  
БЛ – базовая линия;  
ЗО – зона обнаружения;  
КЗ – контролируемая зона;  
П – передатчик;  
Пр – приемник;

## Список литературы

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – ВИРТА, 1984. – 410 с.
2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М. «Сов. радио», 1975. – 336 с.
4. Зиганшин Э. Г. Методы обнаружения сверхширокополосных сигналов// [http://uwbgroup.ru/pdf/05\\_usuirca\\_rus\\_id02.pdf](http://uwbgroup.ru/pdf/05_usuirca_rus_id02.pdf)
5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Радиолокация>.
6. Запевалов В.В. Метод измерения времени распространения импульсных радиосигналов при малых дальностях// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2012. - №23.
7. Импульсные сигналы. Кат.:Радиолокационные сигналы <http://radiosounding.ru/impulsnye-signaly.html>
8. Костылев В. И., Звягин Д. В. Типы измерительных радиотехнических систем// Вестник Воронежского института МВД России. – 2009. - №03.
9. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
10. Bezoušek P., Schejbal V. Bistatic and Multistatic Radar Systems// RADIOENGINEERING. - SEPTEMBER 2008, № 3.
11. Baker C. J., Griffiths H. D. Bistatic and Multistatic Radar Sensors for Homeland Security// Military Technology. - 2006, № 12.
12. Nicholas J. Willis Bistatic Radar. – SCITECH, 2005. – 337 с.
13. Griffiths H. D. Bistatic and Multistatic Radar// [http://www.itc.ku.edu/~callen/energy\\_harvesting/Griffiths2003pp9.pdf](http://www.itc.ku.edu/~callen/energy_harvesting/Griffiths2003pp9.pdf)
14. Бондаренко Е.А., Волобоев В.П., Клименко В.П. Стелс-технологии в кораблестроении и методы противодействия радиолокационным станциям берегового (морского, воздушного) базирования// Математические машины и системы. – 2006. – том 1, №4.
15. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Стелс-технология>
16. Бляхман А.Б., Смирнов Е.А. Радиолокационный комплекс. - Патент РФ № 2324197, МПК G01S3/72, Заяв. № 2006105178/09, 20.02.2006; Опубл. 10.05.2008.
17. Чапурский, В.В. Синтезированная теневая радиоголография в бистатической радиолокации // Радиотехника. - 2009. № 3.
18. Ковалев Ф.Н. Просветные многопозиционные радиолокационные системы на основе измерений доплеровской частоты // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. – 2011, № 3.

19. Бляхман, А.Б. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации «на просвет»/ А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4.
20. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Алгоритм определения координат цели в просветном радиолокаторе с разнесенным приемом// Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014, № 1.
21. Бляхман А.Б.; Самарин А.В. Радиолокационный способ определения параметров движения объекта. - Патент РФ № 2133480, МПК G01S3/72, G01S7/42, Заяв. № 98101955/09, 02.02.1998; Оpubл. 20.07.1999.
22. Бляхман А.Б., Самарин А.В. Бистатическая РЛС. Заявка №200401555 с приоритетом от 23.12.2004 г. Евразийский патент №007143.
23. Рындык А.Г. Точность определения координат методом максимального правдоподобия при локации «на просвет» // Радиотехника и электроника. - 1999. Т. 44. № 12.
24. Chapurskiy, V. SISAR: shadow inverse synthetic aperture radiolocation/ V. Chapurskiy V. Sablin // IEEE International Radar Conference, Alexandria. – USA, May 2000.
25. Бляхман А.Б. Рындык А.Г. Ковалев Ф.Н. Устройство для определения параметров движения цели. – Патент РФ № 2124220, МПК G01S13/06, Заяв. № 97117868/09, 29.10.1997; Оpubл. 27.12.1998.
26. Ковалев Ф. Н., Кондратьев В.В. Особенности угломерно-дальномерного метода определения местоположения цели в просветных бистатических радиолокаторах // Журнал радиоэлектроники. – 2014. №4.
27. Ковалев Ф. Н. Интегральный доплеровский метод измерения угловых координат объекта в системах радиолокации на просвет // Журнал радиоэлектроники. – 2013. №12.
28. Ковалев Ф.Н. Точность местоопределения цели в бистатической радиолокационной системе // Радиотехника. – 2013. – №8.
29. Харни О., Махони К., перев. Казакевич А. Беспроводные устройства ближнего радиуса действия: нелицензируемый диапазон ниже 1 ГГц/ Беспроводные технологии № 1, 2007г.
30. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М., «Связь», 1972. – 336 с.
31. Кузубаев Р.Г. Экспериментальное исследование мощности распространения сигнала в бистатических РЛС // Сборник Научных трудов «Энергетика, радиотехника, электроника и связь», «Радиотехника, электроника и связь» Алматы, 2014.
32. Кузубаев Р.Г., Рутгайзер О.З. Заявка №2015/ на выдачу патента на изобретение «Способ определения координаты объекта».



## Приложение А

Моделирование зоны обнаружения БРЛС (нулевая зона Френеля) в Mathcad 14:

$$\begin{aligned}
 c_{\text{xxx}} &:= 3 \cdot 10^8 & L_{\text{xxx}} &:= 20 & L1 &:= 0, 0.1..L \\
 f &:= 2.4 \cdot 10^9 & \lambda &:= \frac{c}{f} = 0.125 \\
 R0(L1) &:= \sqrt{\frac{\lambda \cdot L1 \cdot (L - L1)}{3[L1 + (L - L1)]}} & R01(L1) &:= -\sqrt{\frac{\lambda \cdot L1 \cdot (L - L1)}{3[L1 + (L - L1)]}}
 \end{aligned}$$

Моделирование пересечения объектом контролируемой зоны МРЛС в Mathcad 14:

$$\begin{aligned}
 a &:= 100 & b &:= 15 & c_{\text{xxx}} &:= 10.0 & d &:= 2.5 & L_{\text{xxx}} &:= 0, 0.1..a \\
 \alpha &:= \operatorname{atan}\left(\frac{b}{a}\right) = 0.149 & BL1(L) &:= b - \tan(\alpha) \cdot L \\
 BL2(L) &:= k \cdot L + c \\
 BL3(L) &:= k \cdot L + d \\
 BL4(L) &:= \tan(\alpha) \cdot L \\
 BL5(L) &:= k \cdot L \\
 V_0 &:= 1 & S_{\text{xxx}} &:= 40 \\
 b1 &:= S \cdot \tan(\alpha) & b2 &:= (a - S) \cdot \tan(\alpha)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 to1 &:= \begin{cases} \frac{b1}{V_0} & \text{if } S \leq \frac{a}{3} \\ \frac{(b - c)}{V_0} & \text{if } S > \frac{a}{3} \\ \frac{b2}{V_0} & \text{if } S > \frac{2}{3} \cdot a \end{cases} & to2 &:= \begin{cases} \frac{b - c}{V_0} & \text{if } S \leq \frac{a}{3} \\ \frac{(b1)}{V_0} & \text{if } S > \frac{a}{3} \\ \frac{b2}{V_0} & \text{if } S > \frac{a}{2} \\ \frac{b - c}{V_0} & \text{if } S > \frac{2}{3} \cdot a \end{cases}
 \end{aligned}$$

Продолжение приложения А

$$\begin{aligned}
 \text{to3} &:= \begin{cases} \frac{b-d}{V_0} & \text{if } S \leq \frac{a}{6} \\ \frac{(b2)}{V_0} & \text{if } S > \frac{a}{6} \\ \frac{b1}{V_0} & \text{if } S > \frac{a}{2} \\ \frac{b-d}{V_0} & \text{if } S > \frac{5}{6} \cdot a \end{cases} &
 \text{to4} &:= \begin{cases} \frac{b2}{V_0} & \text{if } S \leq \frac{a}{6} \\ \frac{(b-d)}{V_0} & \text{if } S > \frac{a}{6} \\ \frac{b1}{V_0} & \text{if } S > \frac{5}{6} \cdot a \end{cases} &
 \text{to5} &:= \frac{b}{V_0}
 \end{aligned}$$

$$\text{to1} = 4.95 \quad \text{to2} = 6 \quad \text{to3} = 9 \quad \text{to4} = 12.45 \quad \text{to5} = 15$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tpr1} &:= \begin{cases} \text{to4} & \text{if } S \leq \frac{a}{6} \\ \text{to3} & \text{if } S > \frac{a}{6} \\ \text{to2} & \text{if } S > \frac{a}{2} \\ \text{to1} & \text{if } S > \frac{2a}{3} \end{cases} &
 \text{Tpr2} &:= \begin{cases} \text{to2} & \text{if } S \leq \frac{a}{3} \\ \text{to1} & \text{if } S > \frac{a}{3} \\ \text{to2} & \text{if } S > \frac{2a}{3} \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tpr3} &:= \begin{cases} \text{to3} & \text{if } S \leq \frac{a}{6} \\ \text{to4} & \text{if } S > \frac{a}{6} \\ \text{to3} & \text{if } S > \frac{5a}{6} \end{cases} &
 \text{Tpr4} &:= \begin{cases} \text{to1} & \text{if } S \leq \frac{a}{3} \\ \text{to2} & \text{if } S > \frac{a}{3} \\ \text{to3} & \text{if } S > \frac{a}{2} \\ \text{to4} & \text{if } S > \frac{5a}{6} \end{cases} &
 \text{Tpr5} &:= \text{to5}
 \end{aligned}$$

$$\text{Tpr1} = 9 \quad \text{Tpr2} = 4.95 \quad \text{Tpr3} = 12.45 \quad \text{Tpr4} = 6 \quad \text{Tpr5} = 15$$

Моделирование определения координат пересечения объектом КЗ без остановок в Mathcad 14:

Задаются произвольные значения времени, с условием соблюдения предыдущего интервала:

$$\text{tpr1} := 11.5' \quad \text{tpr2} := 7.5' \quad \text{tpr3} := 15' \quad \text{tpr4} := 8.5' \quad \text{tpr5} := 17.5'$$

$$\underline{V} := \frac{d}{\text{tpr5} - \text{tpr3}} = 1 \quad \underline{cd} := V \cdot (\text{tpr3} - \text{tpr2}) = 7.5$$

Продолжение приложения А

$$\begin{aligned}
 X1 := & \left[ \frac{a}{3} + \frac{V \cdot (tpr4 - tpr2)}{\tan(\alpha)} \right] \text{ if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 < tpr4 \\
 & \frac{a}{2} \text{ if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 = tpr4 \\
 & \left[ \frac{2a}{3} - \frac{V \cdot (tpr1 - tpr2)}{\tan(\alpha)} \right] \text{ if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 > tpr4 \\
 & 0 \text{ if } tpr1 = tpr5 \\
 & \frac{a}{6} \text{ if } tpr1 = tpr3 \\
 & \frac{a}{3} \text{ if } tpr2 = tpr4 \\
 & \frac{a}{2} \text{ if } tpr1 = tpr4 \\
 & \frac{2a}{3} \text{ if } tpr1 = tpr2 \\
 & \frac{5a}{6} \text{ if } tpr3 = tpr4 \\
 & a \text{ if } tpr4 = tpr5 \\
 & 0 \text{ if } cd > c - d \wedge tpr1 > tpr3 \\
 & \frac{a}{6} \text{ if } cd > c - d \wedge (tpr4 < tpr2 \wedge tpr1 < tpr3) \\
 & \frac{a}{3} \text{ if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr4 \wedge (tpr1 < tpr3 \wedge tpr1 > tpr4)] \\
 & \frac{a}{2} \text{ if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr1 \wedge (tpr4 < tpr3 \wedge tpr1 < tpr4)] \\
 & \frac{2a}{3} \text{ if } cd > c - d \wedge (tpr2 > tpr1 \wedge tpr4 < tpr3) \\
 & \frac{5a}{6} \text{ if } cd > c - d \wedge tpr4 > tpr3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X2 := & X1 \text{ if } cd \leq (c - d) \\
 & \frac{a}{6} \text{ if } cd > c - d \wedge tpr1 > tpr3 \\
 & \frac{a}{3} \text{ if } cd > c - d \wedge (tpr4 < tpr2 \wedge tpr1 < tpr3) \\
 & \frac{a}{2} \text{ if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr4 \wedge (tpr1 < tpr3 \wedge tpr1 > tpr4)] \\
 & \frac{2a}{3} \text{ if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr1 \wedge (tpr4 < tpr3 \wedge tpr1 < tpr4)] \\
 & \frac{5a}{6} \text{ if } cd > c - d \wedge (tpr2 > tpr1 \wedge tpr4 < tpr3) \\
 & a \text{ if } cd > c - d \wedge tpr4 > tpr3
 \end{aligned}$$

$$X1 = 39.667$$

$$X2 = 39.667$$

Продолжение приложения А

Моделирование определения координат пересечения объектом КЗ с остановкой между БЛ2 и БЛ3 в Mathcad 14:

Задаются произвольные значения времени, с отличным с предыдущим интервалом:

$$tpr1 := 11.5' \quad tpr2 := 7.5' \quad tpr3 := 18' \quad tpr4 := 8.5' \quad tpr5 := 20.5'$$

$$V := \frac{d}{tpr5 - tpr3} = 1 \quad cd := V \cdot (tpr3 - tpr2) = 10.5$$

$$X1 := \begin{cases} \left[ \frac{a}{3} + \frac{V \cdot (tpr4 - tpr2)}{\tan(\alpha)} \right] & \text{if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 < tpr4 \\ \frac{a}{2} & \text{if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 = tpr4 \\ \left[ \frac{2a}{3} - \frac{V \cdot (tpr1 - tpr2)}{\tan(\alpha)} \right] & \text{if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 > tpr4 \\ 0 & \text{if } tpr1 = tpr5 \\ \frac{a}{6} & \text{if } tpr1 = tpr3 \\ \frac{a}{3} & \text{if } tpr2 = tpr4 \\ \frac{a}{2} & \text{if } tpr1 = tpr4 \\ \frac{2a}{3} & \text{if } tpr1 = tpr2 \\ \frac{5a}{6} & \text{if } tpr3 = tpr4 \\ a & \text{if } tpr4 = tpr5 \\ 0 & \text{if } cd > c - d \wedge tpr1 > tpr3 \\ \frac{a}{6} & \text{if } cd > c - d \wedge (tpr4 < tpr2 \wedge tpr1 < tpr3) \\ \frac{a}{3} & \text{if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr4 \wedge (tpr1 < tpr3 \wedge tpr1 > tpr4)] \\ \frac{a}{2} & \text{if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr1 \wedge (tpr4 < tpr3 \wedge tpr1 < tpr4)] \\ \frac{2a}{3} & \text{if } cd > c - d \wedge (tpr2 > tpr1 \wedge tpr4 < tpr3) \\ \frac{5a}{6} & \text{if } cd > c - d \wedge tpr4 > tpr3 \end{cases}$$

Продолжение приложения А

$$X2 := \begin{cases} X1 & \text{if } cd \leq (c - d) \\ \frac{a}{6} & \text{if } cd > c - d \wedge tpr1 > tpr3 \\ \frac{a}{3} & \text{if } cd > c - d \wedge (tpr4 < tpr2 \wedge tpr1 < tpr3) \\ \frac{a}{2} & \text{if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr4 \wedge (tpr1 < tpr3 \wedge tpr1 > tpr4)] \\ \frac{2a}{3} & \text{if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr1 \wedge (tpr4 < tpr3 \wedge tpr1 < tpr4)] \\ \frac{5a}{6} & \text{if } cd > c - d \wedge (tpr2 > tpr1 \wedge tpr4 < tpr3) \\ a & \text{if } cd > c - d \wedge tpr4 > tpr3 \end{cases}$$

$$X1 = 33.333 \quad X2 = 50$$

Моделирование определения координат пересечения объектом КЗ с остановкой между БЛЗ и БЛ5 в Mathcad 14:

Задаются произвольные значения времени, с отличным с предыдущим интервалом:

$$tpr1 := 11.5' \quad tpr2 := 7.4' \quad tpr3 := 14' \quad tpr4 := 8.5' \quad tpr5 := 30.5'$$

$$V := \frac{d}{tpr5 - tpr3} = 0.164 \quad cd := V \cdot (tpr3 - tpr2) = 1.23$$

$$X2 := \begin{cases} X1 & \text{if } cd \leq (c - d) \\ \frac{a}{6} & \text{if } cd > c - d \wedge tpr1 > tpr3 \\ \frac{a}{3} & \text{if } cd > c - d \wedge (tpr4 < tpr2 \wedge tpr1 < tpr3) \\ \frac{a}{2} & \text{if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr4 \wedge (tpr1 < tpr3 \wedge tpr1 > tpr4)] \\ \frac{2a}{3} & \text{if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr1 \wedge (tpr4 < tpr3 \wedge tpr1 < tpr4)] \\ \frac{5a}{6} & \text{if } cd > c - d \wedge (tpr2 > tpr1 \wedge tpr4 < tpr3) \\ a & \text{if } cd > c - d \wedge tpr4 > tpr3 \end{cases}$$

Продолжение приложения А

$$X1 := \left[ \begin{array}{l}
 \left[ \frac{a}{3} + \frac{V \cdot (tpr4 - tpr2)}{\tan(\alpha)} \right] \text{ if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 < tpr4 \\
 \frac{a}{2} \text{ if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 = tpr4 \\
 \left[ \frac{2a}{3} - \frac{V \cdot (tpr1 - tpr2)}{\tan(\alpha)} \right] \text{ if } cd \leq (c - d) \wedge tpr1 > tpr4 \\
 0 \text{ if } tpr1 = tpr5 \\
 \frac{a}{6} \text{ if } tpr1 = tpr3 \\
 \frac{a}{3} \text{ if } tpr2 = tpr4 \\
 \frac{a}{2} \text{ if } tpr1 = tpr4 \\
 \frac{2a}{3} \text{ if } tpr1 = tpr2 \\
 \frac{5a}{6} \text{ if } tpr3 = tpr4 \\
 a \text{ if } tpr4 = tpr5 \\
 0 \text{ if } cd > c - d \wedge tpr1 > tpr3 \\
 \frac{a}{6} \text{ if } cd > c - d \wedge (tpr4 < tpr2 \wedge tpr1 < tpr3) \\
 \frac{a}{3} \text{ if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr4 \wedge (tpr1 < tpr3 \wedge tpr1 > tpr4)] \\
 \frac{a}{2} \text{ if } cd > c - d \wedge [tpr2 < tpr1 \wedge (tpr4 < tpr3 \wedge tpr1 < tpr4)] \\
 \frac{2a}{3} \text{ if } cd > c - d \wedge (tpr2 > tpr1 \wedge tpr4 < tpr3) \\
 \frac{5a}{6} \text{ if } cd > c - d \wedge tpr4 > tpr3
 \end{array} \right.$$

X1 = 62.239

X2 = 62.239