

VI ежегодная научная конференция школьников  
Иркутской области «Человек и космос»

**Учет препятствий и рельефа земной  
поверхности в системах сотовой связи**

Автор:

Корнеева Софья Алексеевна  
11 «ф» кл. МБОУ ШР  
«Шелеховский лицей»  
г. Шелехова

Научный руководитель:

Сажин Виктор Иванович  
зав. кафедрой радиофизики  
и радиоэлектроники ИГУ

Руководитель:

Демидова Людмила Ивановна  
Учитель физики МБОУ ШР  
«Шелеховский лицей»  
г. Шелехова.

г. Иркутск, 2016 г.

# Содержание:

Введение	3
Глава 1. Система сотовой связи	4
1.1 Принцип действия сотовой связи	4
1.2 Проблемы развития сотовой связи	5
Глава 2. Особенности распространения волн в системах сотовой связи	6
2.1 Физические явления при распространении волн в системах сотовой связи	6
2.2 Механизмы распространения радиоволн в системах сотовой связи	6
2.3 Область существенная для распространения энергии	7
2.4 Учет отраженной волны	9
Глава 3. Практическое применение методики учета препятствий и отраженной волны	10
3.1. Учет препятствий	10
3.2. Учет отраженной волны	11
Заключение	12
Список используемых источников	12
Приложение	13

# Введение

В современном мире мы не можем представить свою жизнь без сотовых телефонов. Но мало кто задумывался, как работает, и как устроена система сотовой связи.

Что же такое система сотовой связи? Система сотовой связи (ССС)- это Радиотелефонная сеть, созданная для передвижных абонентов, соединяющая их с основной системой телефонной связи. Она состоит из приемно-передающей станции, связанной с основной телефонной сетью. Передвижной абонент соединяется с ней посредством действующего на батарейках радиотелефона. По мере передвижения от одной станции к другой (например, на автомобиле) абоненты автоматически переключаются на другую станцию и могут принимать сигналы из нового района. Наверняка у каждого человека была такая ситуация, когда в телефонной трубке были слышны помехи или вообще не слышали другого абонента. Одной из причин таких неполадок, является большая застроенность. Радиоволна, проходя через различные препятствия (например, стена) теряет часть энергии, возможно пройдя через одно препятствие, у радиоволны будет достаточно энергии что бы она нашла нужную Базовую Станцию (БС), а пройдя два или три препятствия она теряет уже большую часть энергии и тогда она уже не может найти нужную БС. Но ведь в больших мегаполисах каждый день миллионы людей общаются с помощью сотовой связи и вероятность того, что произойдет сбой довольно таки мала. Всё дело в том, что базовые станции располагаются таким образом, чтобы на пути радиоволны системы сотовой связи как можно меньше попадались препятствия различного рода. Но что бы знать, как и где правильно поставить БС нужно произвести какие-то расчеты и вычисления. И целью моей курсовой работы является показать основные расчеты и вычисления при проектировке и установке БС и учета препятствий на их пути и отраженной волны.

# Глава 1. Система сотовой связи.

## 1.1 Принцип действия системы сотовой связи

[6]Сотовая связь, сеть подвижной связи – один из видов мобильной радиосвязи, в основе которого лежит сотовая сеть. Ключевая особенность заключается в том, что общая зона покрытия делится на ячейки (соты), определяющиеся зонами покрытия отдельных базовых станций (БС). Соты частично перекрываются и вместе образуют сеть. На идеальной (ровной и без застройки) поверхности зона покрытия одной БС представляет собой круг, поэтому составленная из них сеть имеет вид шестиугольных ячеек (сот).

Сеть составляют разнесенные в пространстве приемопередатчики, работающие в одном и том же частотном диапазоне, и коммутирующее оборудование, позволяющее определять текущее местоположение подвижных абонентов и обеспечивать непрерывность связи при перемещении абонента из зоны действия одного приёмопередатчика в зону действия другого.

Основные составляющие сотовой связи – это сотовые телефоны и базовые станции, которые обычно располагают на крышах зданий и вышках. Будучи включенным, сотовый телефон прослушивает эфир, находя сигнал базовой станции. После этого телефон посыпает станции свой уникальный идентификационный код. Телефон и станция поддерживают постоянный радиоконтакт, периодически обмениваясь пакетами. Связь телефона со станцией может идти по аналоговому протоколу или по цифровому. Если телефон выходит из поля действия базовой станции, он налаживает связь с другой.

Сотовые сети могут состоять из базовых станций разного стандарта, что позволяет оптимизировать работу сети и улучшить её покрытие.

Сотовые сети разных операторов соединены друг с другом, а также со стационарной телефонной сетью. Это позволяет абонентам одного делать звонки абонентам другого оператора, с мобильных телефонов на стационарные и со стационарных на мобильные.

Операторы могут заключать между собой договоры роуминга. Благодаря таким договорам абонент, находясь вне зоны покрытия своей сети, может совершать и принимать звонки через сеть другого оператора. Как правило, это осуществляется по повышенным тарифам. Возможность роуминга появилась лишь в стандартах 2G и является одним из главных отличий от сетей 1G. Операторы могут совместно использовать инфраструктуру сети, сокращая затраты на развертывание сети и текущие издержки.

## 1.2. Проблемы развития сотовой связи

Проблема первая:

В процессе проектирования необходимо оценить фактическую зону радио - покрытия базовой станции. Точный расчет этого параметра весьма сложен и требует значительных трудозатрат.

Проблема вторая:

Для густозаселенных регионов весьма характерна значительная интенсивность помех искусственной природы, источниками которых служат:

- электротранспорт и системы зажигания автомобилей;
- промышленные электроустановки;
- радиоэлектронные средства различного назначения.

Особо следует отметить внутрисистемные помехи, обусловленные одновременной работой в одной полосе частот нескольких станций.

Серьезные проблемы связаны также со специфическими условиями функционирования станций мобильной радиосвязи, зоной действия которых являются, в основном, города и пригороды с различным характером застройки, интенсивностью движения транспорта, типом поверхность и т.п. В связи с этим в их работе проявляются следующие негативные факторы:

- сигнал в точку приема поступает в результате многолучевого распространения, т.е. переотражения от многочисленных препятствий;
- движение самой мобильной станции приводит к появлению доплеровского сдвига частоты.

Для учета названных факторов выполняются исследования в области разработки схем оптимального приема радиоволн в условиях многолучевости.

Проблема третья:

Потребность в увеличении числа каналов. В используемых системах сотовой связи на один канал предусмотрена полоса в 200 кГц. Соответственно в рабочем диапазоне 35 МГц образуется всего 124 канала. Аналогичная полоса частот предусмотрена для организации обратного канала в дуплексном режиме. Если сделать каналы более узкополосными, уменьшив соответственно ширину, например до 20 кГц, можно на порядок увеличить их общее число. Достичь этого можно путем разработки схемных решений по выделению и передаче в канале только характерных речевых особенностей или окраски речи, которая определяется её формантами.

Тем не менее, операторы сотовой связи предпочитают наращивать число каналов за счет использования более высоких частот передачи. Это ведет к снижению дальности радиосвязи. Например, на рабочей частоте 1800 МГц радиус зоны уверенного приема не превышает 2 км. Это значит, что базовые станции должны устанавливаться на минимальном удалении друг от друга. Создаваемая при этом плотность энергии поля в условиях города может негативно сказываться на здоровье его жителей, что наиболее характерно при размещении антенн на крышах жилых зданий.

## Глава 2. Особенности распространения волн в системах сотовой связи.

### 2.1. Физические явления распространения волн в системах сотовой связи

Используемые в радиосвязи дециметровые радиоволны слабогибают препятствия, т.е. распространяются в основном по прямой, но испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и подстилающей поверхности. Одним из следствий такого многолучевого распространения является более быстрое, чем в свободном пространстве, убывание интенсивности принимаемого сигнала с расстоянием. Другое следствие – замирания и искажения результирующего сигнала.

Область существенных отражений ограничивается обычно сравнительно небольшим участком в окрестности подвижной станции – порядка нескольких сотен длин волн, т.е. порядка нескольких десятков или сотен метров. При движении подвижной станции эта область перемещается вместе с ней таким образом, что подвижная станция все время остается вблизи центра области.

Трасса распространения изменяется как при перемещениях подвижной станции, так и при движении окружающих предметов или окружающей среды. Даже малейшее, самое медленное перемещение приводит к изменению во времени условий многолучевого распространения и, как следствие, к изменению параметров принимаемого сигнала.

Распространение радиоволн в подобных условиях характеризуется тремя, частично самостоятельными эффектами: замирания из-за многолучевости распространения, затенение (или экранирование) и потеря при распространении. Замирания из-за многолучевости описываются через замирания огибающей (независящие от частоты изменения амплитуды),

доплеровское рассеяние (селективный во времени, случайный фазовый шум) и временное рассеяние (изменяющиеся во времени длины трасс распространения отраженных сигналов вызывают изменения самих сигналов).

### 2.2. Механизмы распространения радиоволн в системах сотовой связи

Типовая модель системы мобильной связи включает в себя одну или несколько поднятых антенн базовой станции, относительно короткий участок радиотрассы прямой видимости, несколько радиотрасс с переотражениями, т.е. трасс непрямой видимости, а также несколько антенн подвижных станций.

В большинстве случаев радиосвязь ведется в отсутствие прямой видимости. Геометрическая модель распространения волн в этих условиях

для плоской земной поверхности показано на рисунке 1. Здесь 1- это прямая волна, основной способ передачи энергии; 2- это отраженная от земной поверхности волна, которая, может как усиливать, так и уменьшать энергию волны.

В сложных условиях городской застроенности может существовать более одного пути распространения радиоволн между базовой и мобильной станциями. Такое распространение называется многолучевым. Радиоволны приходят в точку приема в результате многократного отражения от зданий и других объектов. Такие сложные ситуации не рассматриваются в моей работе, мы ограничиваемся простой ситуацией, когда может наблюдаться лишь одна отраженная от земной поверхности волна.

## 2.3. Область существенная для распространения энергии

Помещенная в свободном пространстве изотропная антенна излучает во всех направлениях, и, следовательно, во всех точках окружающего пространства (не на очень больших удалениях от излучателя) плотность потока энергии имеет конечное значение. Рассмотрим способ передачи энергии радиоволны в точку В (рисунок 2), находящуюся на удалении  $r$  от источника.

Можно, во-первых, предположить, что энергия радиоволны попадает в точку В, распространяясь по тоненькой ниточке – «лучу» АВ (в свете понятий геометрической оптики). Можно высказать и другое предположение: попадающая в точку В энергия волны распространяется по определенному, притом конечному, объему в пространстве вокруг оси АВ.

Вопрос о форме пространства, эффективно участвующего в передаче энергии, допускает и аналитическое решение на основе принципа Гюйгенса и представлений о зонах Френеля. Рассмотрим подробней принцип о зонах Френеля.

[1]Французский физик Френель в 1818 г. показал, что построение, подобное показанному на (рисунке 3), допускает весьма наглядное истолкование. Обозначим через  $l_2$  расстояние, измеренное вдоль прямой АВ от пункта приема до поверхности сферы. Проведём из точки В на расстояние

$$l_2 + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Это семейство образует коническую поверхность, пересекающую плоскость рисунка по прямым BN<sub>1</sub> и BN'. Аналогичным образом строятся конические поверхности высших порядков, для которых

$$BN_2 = l_2 + 2 \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

и вообще

$$BN_n = l_2 + n \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Пересечения конических поверхностей со сферой образуют систему концентрических окружностей. Вид на эти окружности со стороны точки В

показан на рисунке 4. Участки, заключенные между соседними окружностями, получили название зон Френеля. Первая зона Френеля представляет собой часть сферы, ограниченную окружностью, а зоны высших порядков представляют собой кольцевые области на поверхности сферы.

Воображаемые источники вторичных волн (так называемые виртуальные источники), расположенные в пределах первой зоны, характеризуются тем, что создаваемые ими фазы колебаний в точке В отличаются от фазы, создаваемой виртуальным читателем в точке N0, не более чем на 1800, так как разности хода в половину длины волны отвечает разность фаз в 1800. Фаза колебаний, создаваемых виртуальным излучателем, расположенными в переделах второй зоны, отличается от фазы колебаний источника N0 на величину от 180 до 3600. Можно сказать, что в целом колебания, создаваемые первой зоной. На рисунке 4 это обстоятельство условно отмечается тем, что последовательные зоны маркируются знаками «плюс» и «минус».

В курсах оптики показывается, что действия смежных зон высших порядков взаимно компенсируются, притом, чем больше порядковый номер зон, тем полнее осуществляется эта компенсация. В результате такой попарной нейтрализации смежных зон совокупное действие всех зон эквивалентно действию примерно половины первой зоны. Таким образом, первая зона Френеля (с известным «запасом») и ограничивает область пространства, существенно участвующего в процессе распространения волн.

Зоны Френеля можно построить на поверхностях весьма произвольной формы. В качестве такой поверхности удобно выбрать плоскость, перпендикулярную направлению распространения АВ (рисунок 6). Вычислим для этого случая радиус зоны Френеля. По определению

$$AN_n + N_n B = l_1 + l_2 + n \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

Из треугольника ANnN0 и BN0Nn имеем :

$$AN_n = \sqrt{l_1^2 + b_n^2} \approx l_1 + \frac{b_n^2}{2l_1} \quad (5)$$

$$BN_n = \sqrt{l_2^2 + b_n^2} \approx l_2 + \frac{b_n^2}{2l_2} \quad (6)$$

Подставляя эти значения в первоначальную формулу, получаем

$$\frac{b_n^2}{2} \left( \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) = n \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

откуда следует

$$b_n = \sqrt{\frac{l_1 l_2 n \lambda}{l_1 + l_2}} \quad (8)$$

В частности, радиус первой зоны Френеля определяется формулой

$$b_1 = \sqrt{\frac{l_1 l_2 \lambda}{l_1 + l_2}} \quad (9)$$

Точки  $N_p$  лежат на поверхности эллипсоида вращения, фокусы которого находятся в точках А и В. Этот эллипсоид и ограничивает область, существенно участвующую в распространении радиоволн (рисунке 6). Радиус первой зоны Френеля достигает максимального значения на середине трассы.

Общий вывод заключается в том, что энергия радиоволны передается не по нитевидному каналу, а в пределах вполне конкретного объема пространства, имеющего форму эллипсоида вращения и ограниченного первой зоной Френеля.

Предположим такую ситуацию, что между двумя передающими антеннами возникло препятствие (например, здание). Как же себя тогда поведет волна?

Возможно 3 ситуации:

- 1 ситуация, когда препятствие полностью перекрыло зону Френеля, тогда радиоволна, исходящая от передающей антенны к принимающей антенне, потеряет очень много энергии и не дойдет до приемной антенны. Такую ситуацию надо исключать.

- 2 ситуация, когда препятствие перекрывает зону Френеля примерно на 50%, тогда возможно, что радиоволна дойдет до приемной антенны, но с плохим сигналом или вообще не дойдет. Лучше такую ситуацию тоже избегать, увеличивая высоты антенн.

- 3 ситуация, когда препятствие перекрывает зону Френеля примерно на 25%, тогда радиоволна дойдет до принимающей антенны, с достаточно хорошим уровнем сигнала

## 2.4. Учет отраженной волны

Рассмотрим такую ситуацию, когда от передающей антенны к приемной антенне идет радиоволна, и на её пути нет никаких препятствий, но сигнал в приемной антенне не слышен. Что же произошло в этой ситуации?

От земной поверхности отразилась волна, которая, создала интерференцию с прямой волной. Такое возможно лишь тогда, когда на земной поверхности есть ровный и прямой участок или ровная водная гладь. Такая ситуация может возникнуть при связи между базовыми станциями системы. Это явление также может наблюдаться и при организации сигнала радиосвязи в стандартах WiMAX. Отраженная волна, как уже говорилось, может создавать интерференцию или же наоборот усиливать сигнал. Для того что бы точно знать как будет влиять отраженная волна, производят специальные расчеты.

На практике при проектировании линии связи, зачастую пренебрегают учетом отраженной волны, настраивая линию связи опытным путем. Проведение расчетов может сэкономить много времени за счет определения условий её формирования.

# Глава 3. Практическое применение методики учета препятствий и отраженной волны.

## 3.1 Учет препятствий

Для наглядного применения методики я взяла конкретную трассу, соответствующую организации линии связи прямой волной между городом Шелехов и моим домом в близко расположенному поселке.

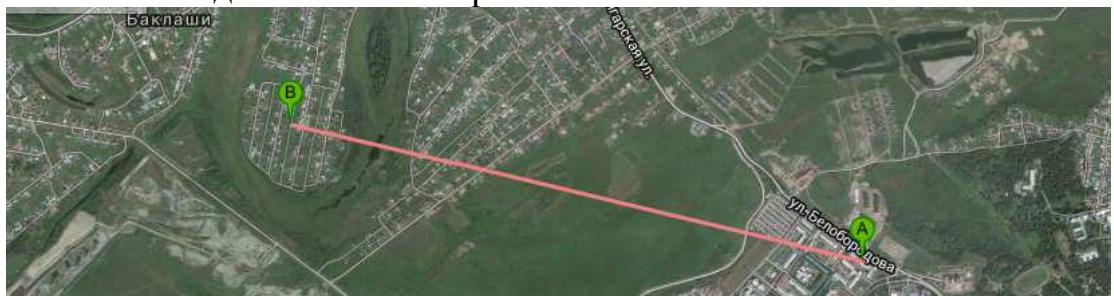


Рисунок 1. Расположение трассы

На рисунке представлена трасса, по которой в дальнейшем пойдет линия связи. В точке А находится передающая антенна, в точке В находится принимающая антенна.

Построим профиль нашей трассы, пользуясь картой Интернет-системой 2Gis для того, чтобы посмотреть, есть ли на пути сигнала препятствия.

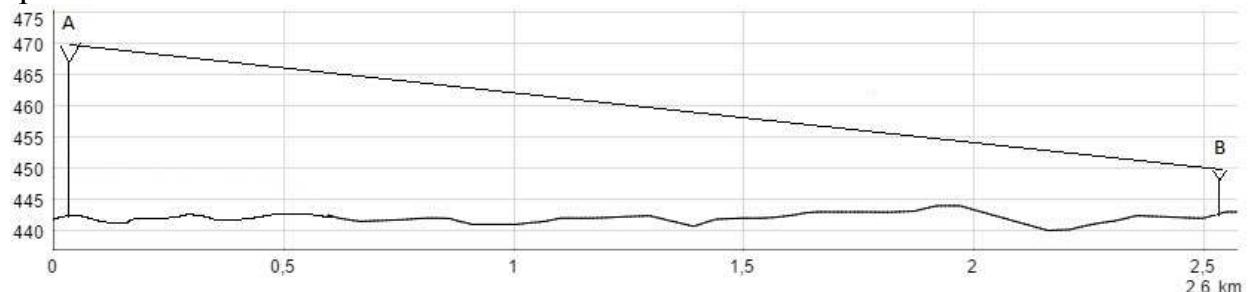


Рисунок 2. Профиль трассы

Рассчитаем радиус I зоны Френеля. Так как у нас трасса довольно таки простая, мы можем упростить формулу (9) до вида:

$$b = \frac{\sqrt{\lambda d}}{2} \quad (10)$$

где  $\lambda$ -это длина волны,  $d$ - расстояние между антеннами. Длина волны высчитывается по формуле[4]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (11)$$

$V$ - это скорость света  $3 \cdot 10^8$  м/с,  $f$  - это частота, и её мы взяли равной  $5 \cdot 10^9$  Гц (стандарт WiMAX).

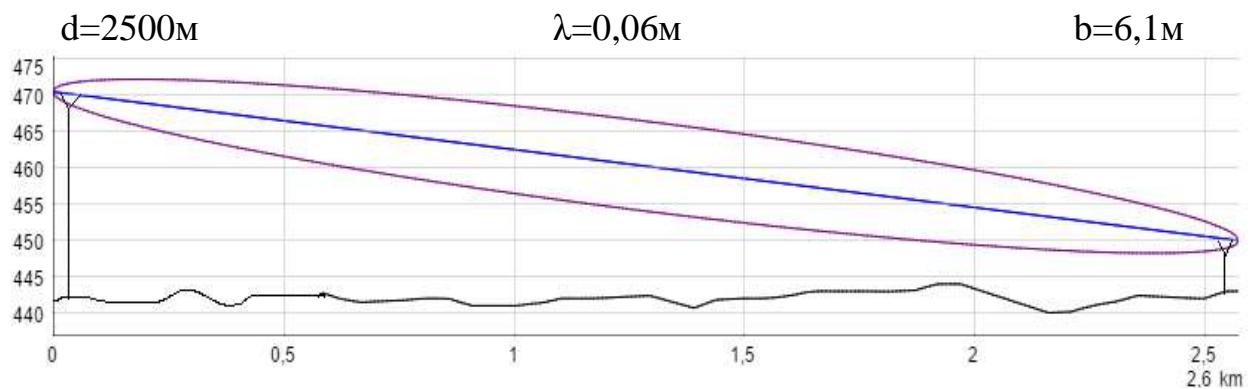


Рисунок 3. Наглядное представление I зоны Френеля

Как видно из профиля трассы, нет объектов перекрывающих I зону Френеля.

### 3.2. Учет отраженной волны

Исследуем данную трассу на наличие отраженной волны. Для того что бы определить в какой точке будет отражаться волны нужно:

1. Отразить зеркально вниз длину передающей антенны.
2. Соединить отраженный конец антенны, с концом принимающей антенны.
3. Точка, которая будет являться пересечением земной поверхности и отрезка соединяющего конец отраженной волны с концом принимающей антенны, и будет являться точкой отражения.
4. Соединяя конец передающей антенны с точкой отражения, и конец принимающей антенны с точкой отражения.

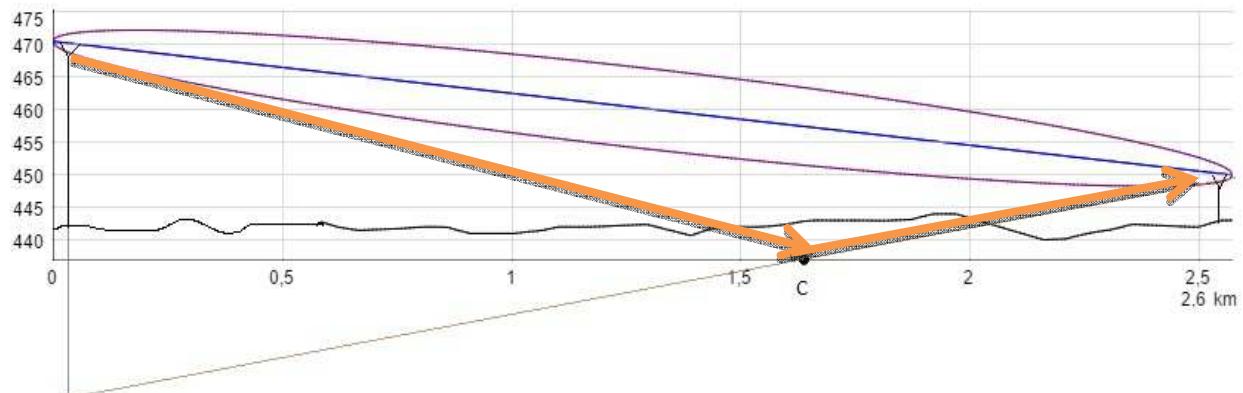


Рисунок 4. Построение отраженной волны

Теперь рассчитаем длину участка, на котором будет отражаться эта волна.

Для расчета поперечника возьмем формулу из учебника для вузов Долуханов М.П. «Распространение радиоволн»:

$$x = \frac{ab}{\sqrt{b^2 + a^2 \varphi^2}} \quad (12)$$

$$a = \frac{d}{2} \quad (13)$$

х- длина поперечника

а-большая ось эллипса;  $a=1,2 * 103$  м

$d$ -длина трассы;  $d=2,5 * 10^3$  м  
 $b$ - радиус I зоны Фринеля;  $b=6,1$  м  
 $\varphi$ - угол скольжения;  $\varphi=6,8 * 10^{-3}$

Получено, что продольный размер области формирования отраженной волны составляет 700м. На рисунке 5 показано положение этой области на трассе. Довольно ровный участок поверхности в этой области позволяет заключить, что условия формирования отраженной волны выполняются. Отметим так же, что поперечные размеры этой области малы и составляют по данным [1] несколько десятков метров.

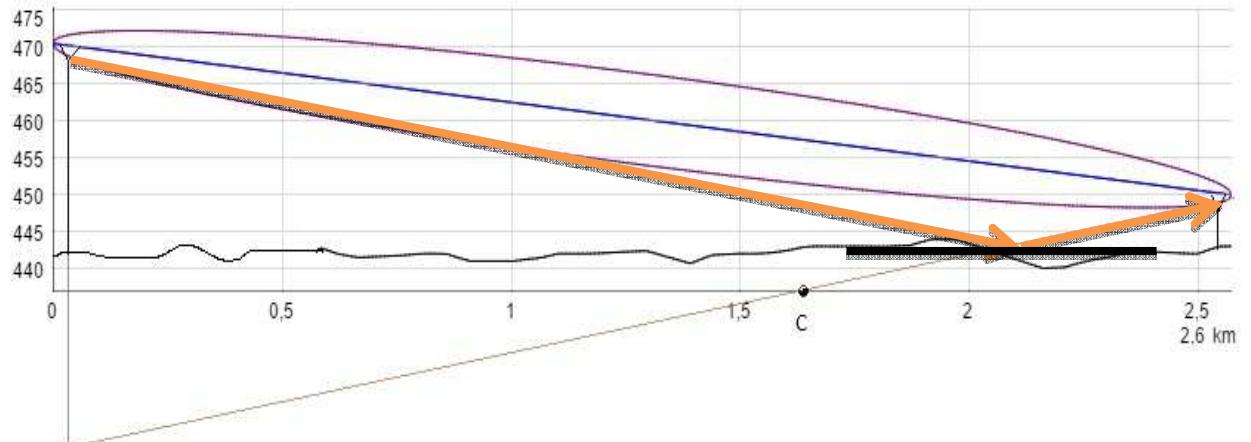


Рисунок 5. Наглядное представление поперечника

Следовательно, необходимо учесть влияние отраженной волны на уровень сигнала для данной трассы, что и будет сделано в дальнейшем.

## Заключение

Для выбранной конкретной трассы проведен учет препятствий на пути прямой волны. Проверена возможность формирования отраженной волны. Получено, что условия формирования отраженной волны выполняются. Поэтому в дальнейшем будет проведен учет её влияния на уровень сигнала на трассе.

## Список использованных источников

- 1) Долуханов М.П. Распространение радиоволн. - Москва: 4-е издание, 1972. – С. 30-99.
- 2) Словари и энциклопедии «Академик» // Система сотовой связи.
- 3) Физика 11 класс Г.Я Мякишев
- 4) [www.wikipedia.ru](http://www.wikipedia.ru)
- 5) <https://2gis.ru/irkutsk>

## Приложение

Рисунок 1

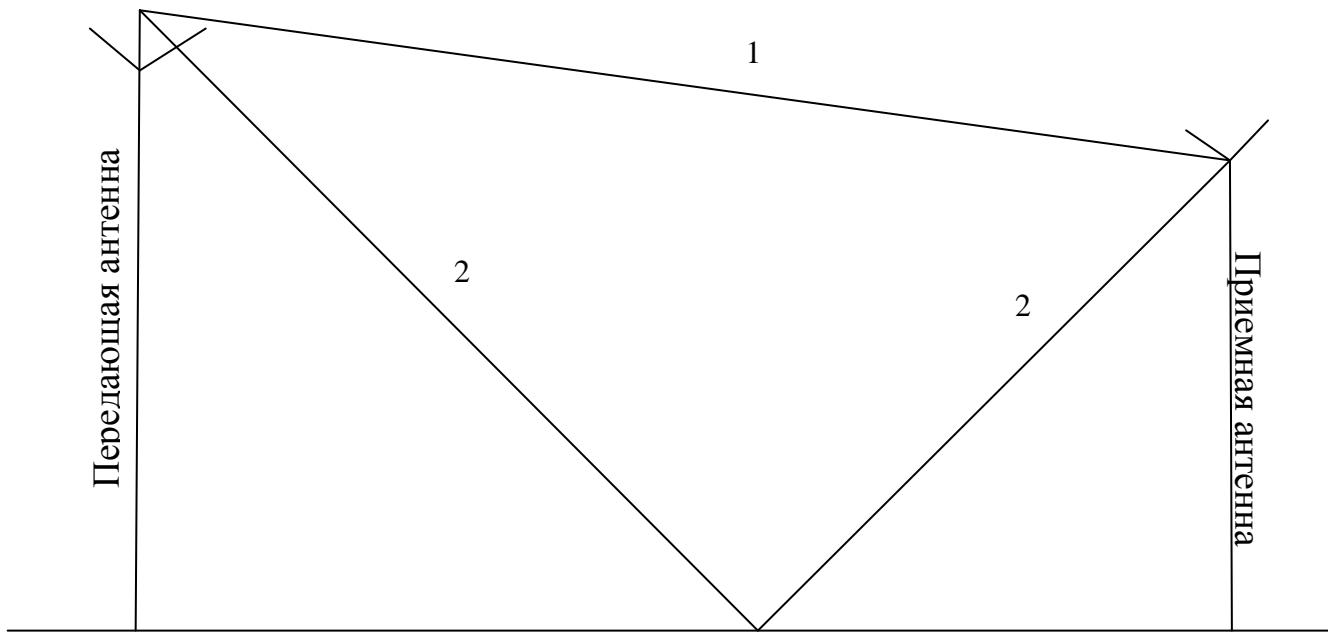


Рисунок 2.

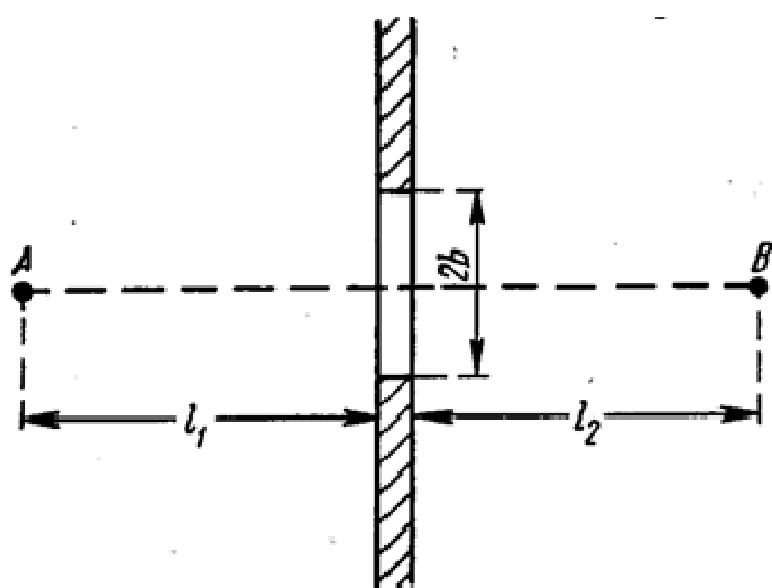


Рисунок 3.

Построение зон Френеля на поверхности сферы.

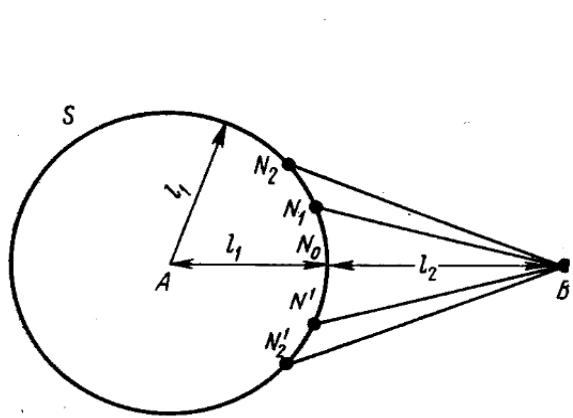


Рисунок 4.

Зоны Френеля на поверхности сферы

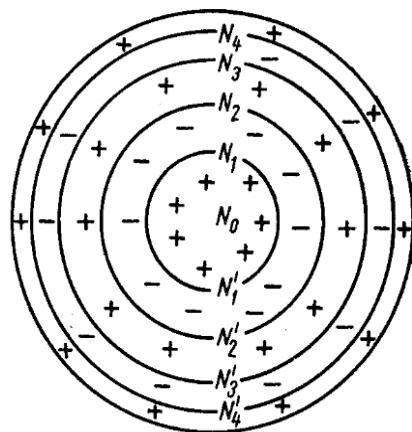
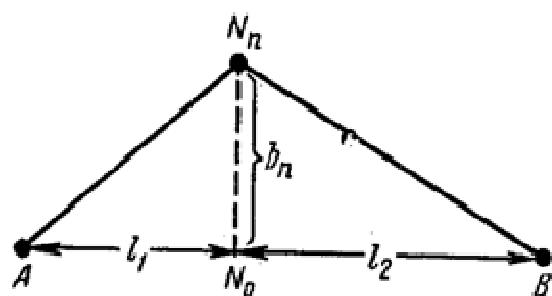
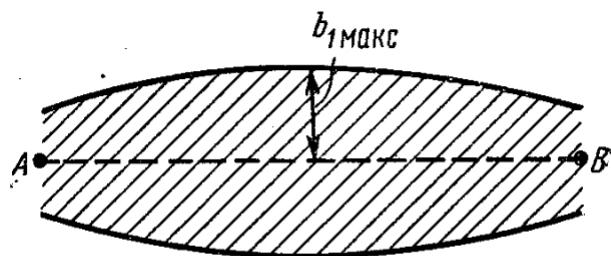


Рисунок 5.



Определение радиусов зон Френеля

Рисунок 6.



Область существенная для распространения волн в свободном пространстве