

Тема 6

Распространение радиоволн в городских условиях

Модуль 2

Рекомендуемые источники

1. Абилов А.В. Распространение радиоволн в сетях подвижной связи: Теоретический материал и задачи для практических занятий – Ижевск: Изд-во ИЖГТУ, 2001. – 24 с.: ил., URL: <http://old.istu.ru/files/material-static/1192/Abilov%20-%20Radio%20propagation.pdf>
2. [Altair](https://altairhyperworks.com/product/FEKO/WinProp-Propagation-Modeling) WinProp - Propagation Modeling, URL: <https://altairhyperworks.com/product/FEKO/WinProp-Propagation-Modeling>

Классификация радиоволн по местности распространения

- распространение радиоволн в свободном пространстве
- распространение радиоволн в городе
- распространение радиоволн в сельской местности
- распространение радиоволн в помещениях

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

- эта модель используется для расчета принятого сигнала в условиях, когда передающая и приемная антенны находятся на открытой незатененной препятствиями радиолинии
- применяется для анализа радиоканалов связи через спутники и для наземных радиолиний, работающих в диапазоне сверхвысоких частот

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

При распространении радиосигнала в свободном пространстве мощность на выходе приемной антенны удобно выразить как функцию от расстояния до передающей антенны:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1)$$

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

- Выражение (1) называют **уравнением свободного пространства**.
- При использовании этого уравнения предполагается, что приемная антенна находится от передающей на расстоянии $d \geq d_0$, которое соответствует дальней зоне (зона Фраунгофера).

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

Уравнение свободного пространства часто выражается по отношению к точке отсчета d_0 , находящейся в зоне Фраунгофера:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (2)$$

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

В качестве значения d_0 принято выбирать

- 1 м – для помещений
- 100 м или 1 км – для открытой местности

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

Для свободного пространства затухание в зоне Фраунгофера определяется из выражения:

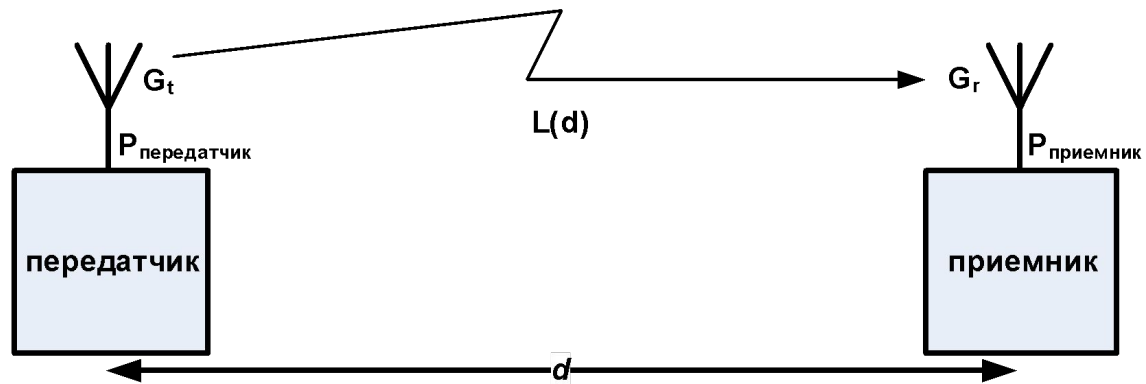
$$L_{\text{св}} = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_1 G_2} \quad (3)$$

Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

Существует другая форма записи затухания в свободном пространстве:

$$L(d) = -10 \lg G_t - 10 \lg G_r + 20 \lg f_{[\text{МГц}]} + 20 \lg d_{[\text{км}]} + 32,44 \quad (4)$$

Параметры распространения радиосигнала



Модель распространения радиосигнала в свободном пространстве

- Уровень мощности сигнала на выходе приемной антенны АС принято обозначать в дБм, тогда выражение (1) удобнее представить в следующем виде:

$$P_r(d) = P_t + G_t - L(d) + G_r$$

(5)

- Затухание сигнала $L(d)$ рассчитывается, исходя из модели распространения.

Распространение радиосигнала в реальных условиях

В реальных условиях распространения радиосигнала на местности величина затухания зависит от комплекса факторов, определяющих характер распространения радиоволн:

- **отражение** сигнала от объектов, имеющих размеры, превосходящие длину радиоволны
- **дифракция** радиоволн, для которой характерно преломление радиосигнала на пути распространения
- **рассеивание** радиосигнала, которое происходит при наличии на местности большого числа объектов, размером меньше длины радиоволны (например, лиственные деревья)
- **эффект Доплера**, имеющий место при перемещении объекта

Распространение радиосигнала в реальных условиях

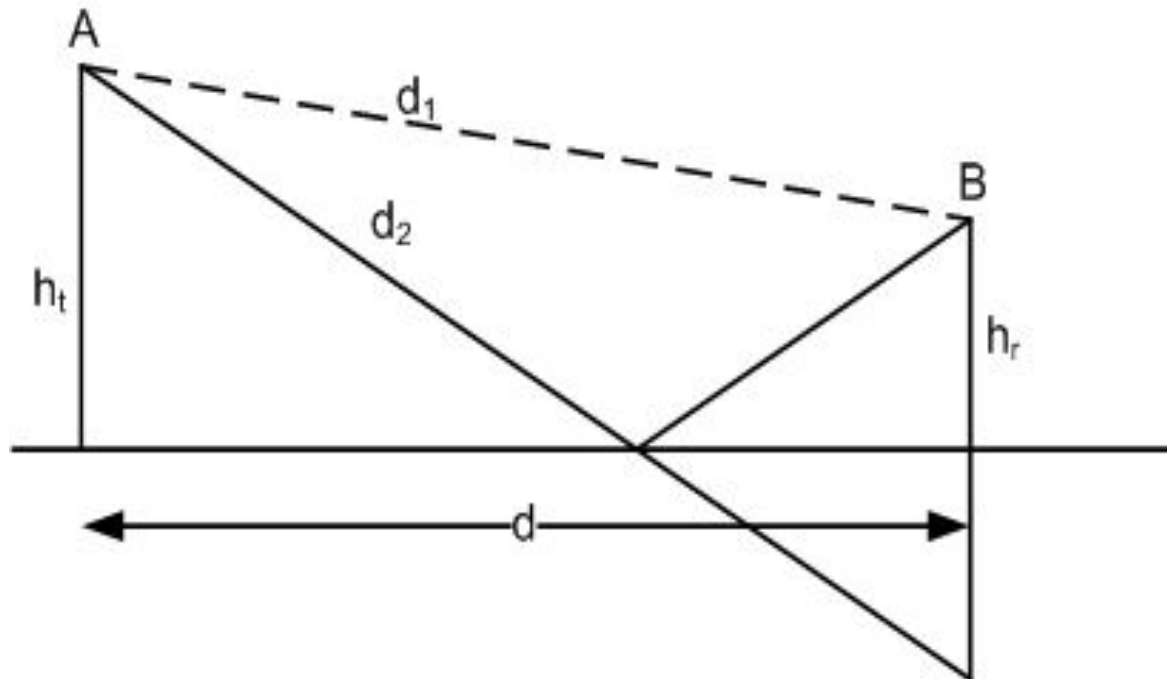
Согласно эмпирическим данным среднее значение затухания растет прямо пропорционально степени α расстояния:

$$L \sim d^\alpha \quad (6)$$

где α – экспонента затухания, определенная экспериментально и лежащая в пределах от 2 до 6 (8), в зависимости от характера местности.

Двухлучевая модель распространения радиосигнала

Для подвижных систем связи описание распространения радиосигнала вдоль земной поверхности может быть представлено двухлучевой моделью



Двухлучевая модель распространения радиосигнала

Если считать, что поверхность Земли является идеальным отражателем, и угол падения луча очень маленький, то для этих условий мощность сигнала на выходе приемной антенны определяется из выражения:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (7)$$

Стандартные модели распространения на открытом пространстве

- Модели распространения, которые оценивают среднюю мощность сигнала для различных расстояний между приемником и передатчиком, в пределах нескольких сотен или тысяч метров, называют **крупномасштабными моделями** распространения.
- Крупномасштабные модели весьма просты и не учитывают малые изменения уровня мощности, например затухания, вызванные многолучевым распространением.
- Эти модели применяются при предсказании охвата системы радиосвязи.

Модель Окамура

| Параметр | Границы применения | |
|--------------------------|--------------------|-------------|
| | основная | расширенная |
| Рабочая частота, МГц | 150 – 2 000 | до 3 000 |
| Протяженность трассы, км | 1 - 20 | до 100 |
| Высота антенны БС, м | 30 - 400 | 1,5 – 1 000 |
| Высота антенны АС, м | 1 - 10 | 1 – 10 |

Модель Окамура

Согласно модели Окамура среднее затухание определяется как

$$L_{50} = L(d) + A(f, d) - H(h_t) - H(h_r) - C, \text{ дБ}$$

$L(d)$ – потери в свободном пространстве, дБ

$A(f, d)$ – затухание в городе относительно затухания в свободном пространстве при высоте антенны передатчика $h_t = 200$ м и высоте приемной антенны $h_r = 3$ м

C – фактор затухания для различных типов местности, дБ

Модель Окамура

Коэффициенты высоты $N(h_t)$ и $N(h_r)$ для антенн базовой и абонентской станции соответственно определяются следующим образом:

$$N(h_t) = 20 \lg \left(\frac{h_t}{200} \right) \quad \text{при } 1000 \text{ м} > h_t > 10 \text{ м}$$

$$N(h_r) = 10 \lg \left(\frac{h_r}{3} \right) \quad \text{при } h_r \leq 3 \text{ м}$$

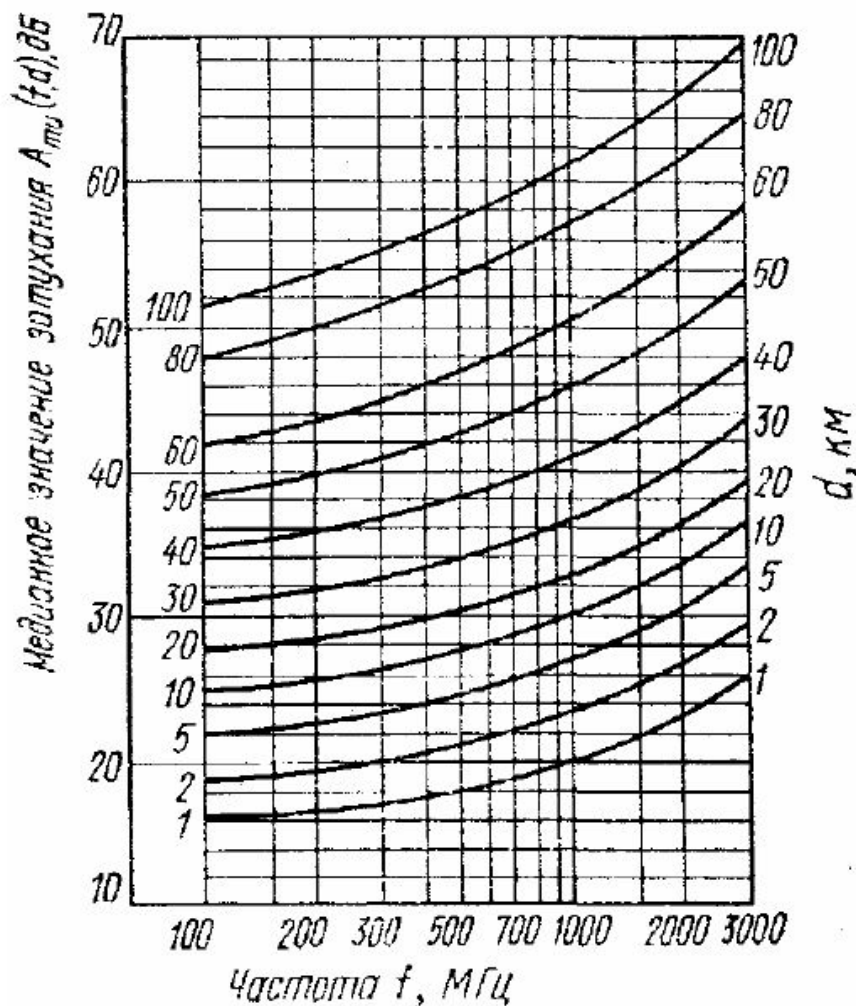
$$N(h_r) = 20 \lg \left(\frac{h_r}{3} \right) \quad \text{при } 10 \text{ м} > h_r > 3 \text{ м}$$

Модель Окамура

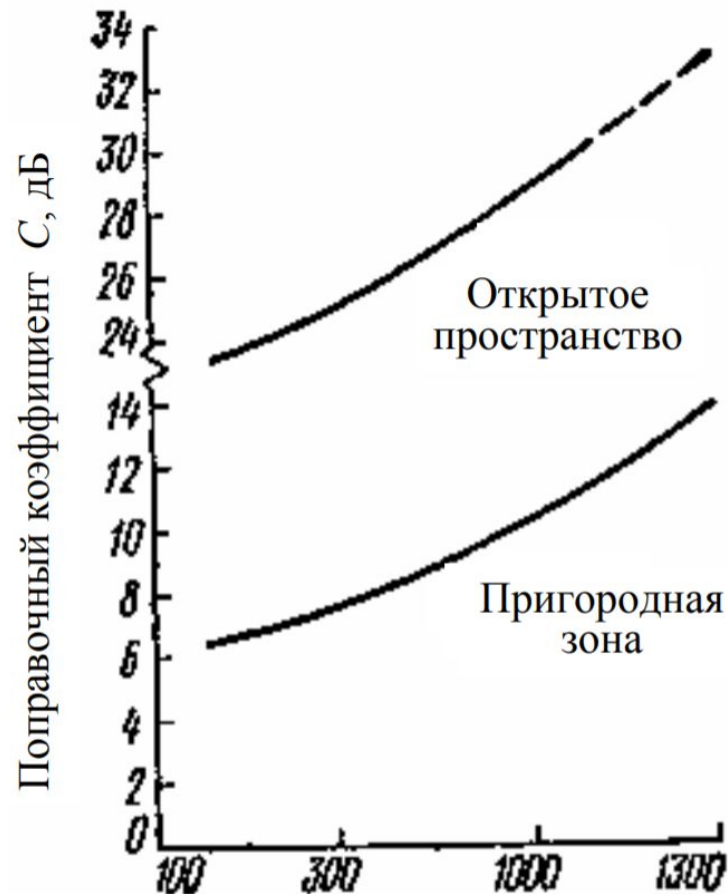
Составляющие для затухания $A(f,d)$ и C определяются графически.

Для сельской местности фактор затухания C на 5 дБ меньше, чем для открытого пространства.

Зависимость затухания в городе относительно затухания в свободном пространстве от частоты сигнала и расстояния при $h_t = 200$ м и $h_r = 3$ м



Зависимость фактора затухания S от частоты сигнала и типа местности



Модель Хата

Допустимые значения параметров

| Параметр | Границы применения | |
|--------------------------|--------------------|-------------|
| | основная | расширенная |
| Рабочая частота, МГц | 150 – 1 500 | 150 – 1 500 |
| Протяженность трассы, км | 1 - 20 | до 80 |
| Высота антенны БС, м | 30 - 200 | 1,5 – 400 |
| Высота антенны АС, м | 1 - 10 | 1 – 10 |

Модель Хата

Среднее затухание радиосигнала в городских условиях рассчитывается по **эмпирической** формуле, дБ:

$$L_{(\text{город})} = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg(h_t)) \lg(d) - a(h_r)$$

где f – частота радиосигнала, МГц

d – дальность связи, км

h_t и h_r – высоты подвеса передающей и приемной антенн, м

$a(h_r)$ – поправочный коэффициент, зависящий от типа местности и определяемый расчетным методом

Модель Хата

Для малых и средних городов:

$$a(h_r) = (1,1 \lg f - 0,7)h_r - (1,56 \lg f - 0,8)$$

Для больших городов:

$$a(h_r) = 8,29[\lg(1,54)]^2 - 1,1 \text{ при } f \leq 400 \text{ МГц}$$

$$a(h_r) = 3,2[\lg(11,75)]^2 - 4,97 \text{ при } f \geq 400 \text{ МГц}$$

Для пригородных районов:

$$L_{\text{пр}} = L_{(\text{город})} - 2[\lg(f/28)]^2 - 5,4$$

Для сельской местности:

$$L_c = L_{(\text{город})} - 4,78(\lg f)^2 + 17,33 \lg f - 40,94$$

Модель COST 231–Хата

Для диапазона частот 1,5...2 ГГц широко используется модель **COST231–Хата**, которая является модифицированным вариантом модели Хата.

Корректировки для пригородных районов не используются.

Для сельской местности поправочный коэффициент $a(h_r)$ тот же, что и в модели Хата.

Модель COST231-Хата

$$L_{(\text{город})} = 46,3 + 33,9 \lg(f) - 13,82 \lg(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg(h_r)) \lg(d) - a(h_r) + C$$

$$a(h_r) = (1,1 \lg(f) - 0,7) h_r - (1,56 \lg(f) - 0,8)$$

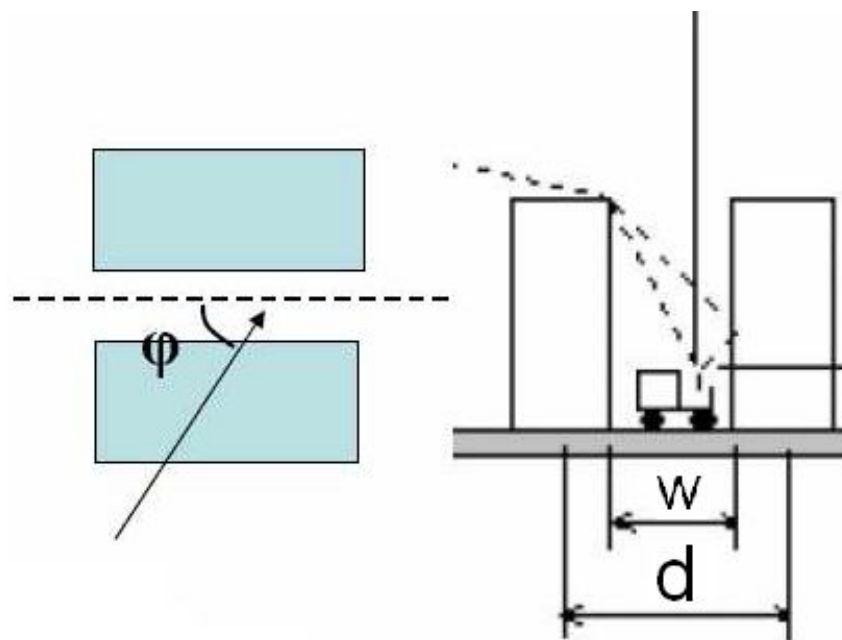
$C=0$ дБ для малых и средних городов

$C=3$ дБ для больших городов

Модель Уолфиша-Икегами

Модель Уолфиша-Икегами признана самой лучшей для предсказания уровня сигнала в малых сотах.

Эта модель основана на физическом представлении поля в точке приема в виде двух составляющих: когерентной и рассеянной.

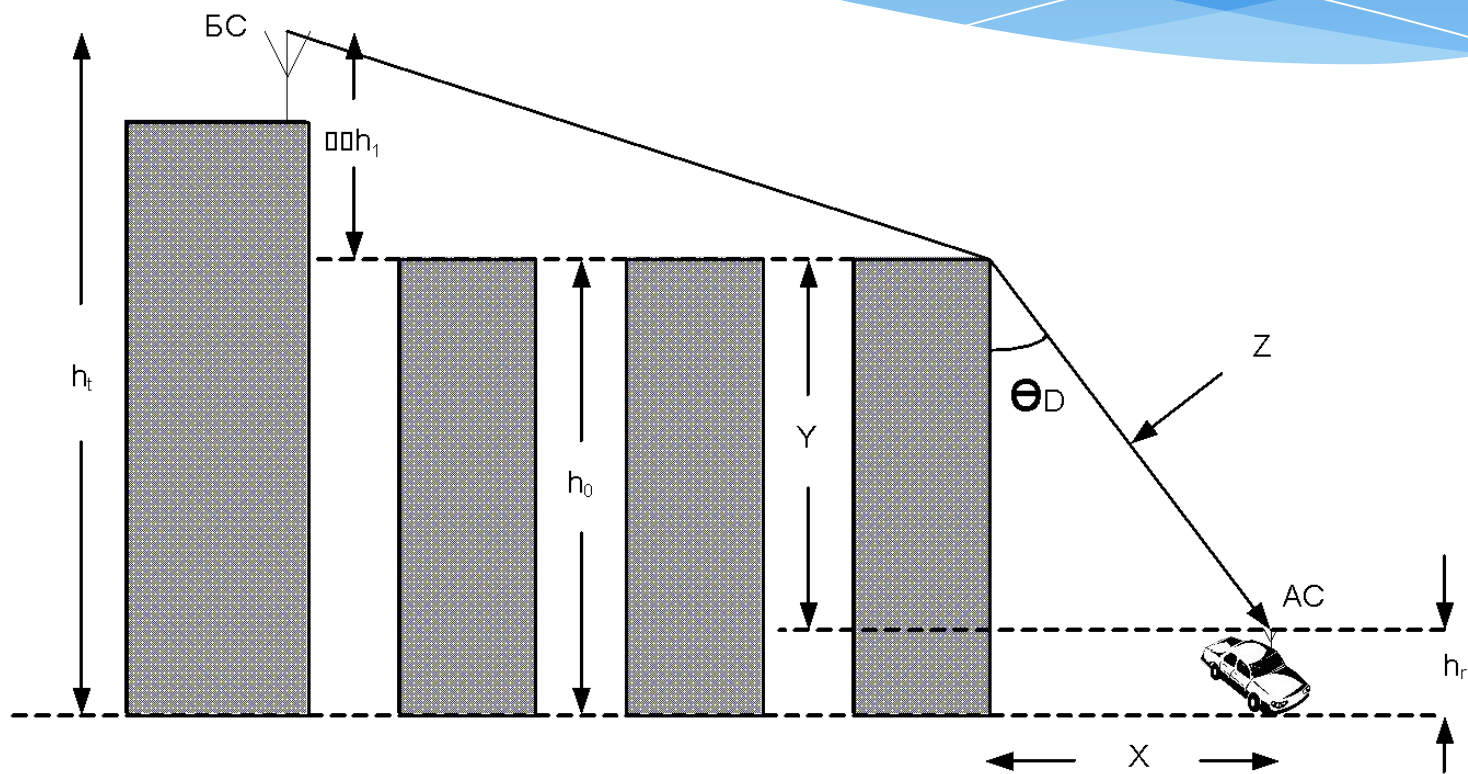


Модель Уолфиша-Икегами

Когерентная составляющая определяется волной, дифрагирующей вокруг строений вдоль дороги со стороны БС

Рассеянный компонент создают волны, которые образуются в результате переизлучения строениями падающей на них волны от БС. Рассеянный компонент приходит с направлений, не совпадающих с направлением на БС и даже противоположных этому направлению

Модель Уолфиша-Икегами



Модель Уолфиша-Икегами

| Параметр | Границы применения |
|--------------------------|--------------------|
| Рабочая частота, МГц | 800-2000 |
| Протяженность трассы, км | 0,02 – 5 |
| Высота антенны БС, м | 4-50 |
| Высота антенны АС, м | 1-3 |

Модель Уолфиша-Икегами

$$L = a_1 + a_2 + a_3,$$

где a_1 - ослабление когерентной волны для точки дифракции

a_2 - дополнительное ослабление когерентной волны, зависящее от угла дифракции

a_3 - дополнительное ослабление уровня сигнала за счет рассеянного компонента

Составляющие a_1 , a_2 , a_3 определяются расчетным методом с учетом высот приемной и передающей антенн, расстояния между приемником и передатчиком, несущей частоты и параметров городской застройки.

Модель *Stanford University Interim (SUI)*

Разработана для стандарта *IEEE 802.16* (городские беспроводные вычислительные сети)

$$L = L_{FS} + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + s, \text{ дБ}$$

где d_0 - расстояние до точки отсчета, находящейся в дальней зоне, м

s - составляющая эффекта затенения

n - показатель ослабления сигнала

Модель *Stanford University Interim (SUI)*

$$n = a - b * h_t + \frac{c}{h_t}, \text{ дБ}$$

коэффициенты a , b , c выбираются в зависимости от типа рельефа

По аналогии с моделью Окамуры модель SUI рассматривает три типа рельефов:

тип А – плотная городская застройка или естественный рельеф с большим количеством препятствий;

тип В – пригородная зона с разновысотными постройками;

тип С – сельская местность или естественная среда с малым количеством препятствий.

Параметры модели *SUI*

| Параметр | Значение для типа рельефа А | Значение для типа рельефа В | Значение для типа рельефа С |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>a</i> | 4,6 | 4,0 | 3,6 |
| <i>b</i> | 0,0075 | 0,0065 | 0,005 |
| <i>c</i> | 12,6 | 17,1 | 20,0 |

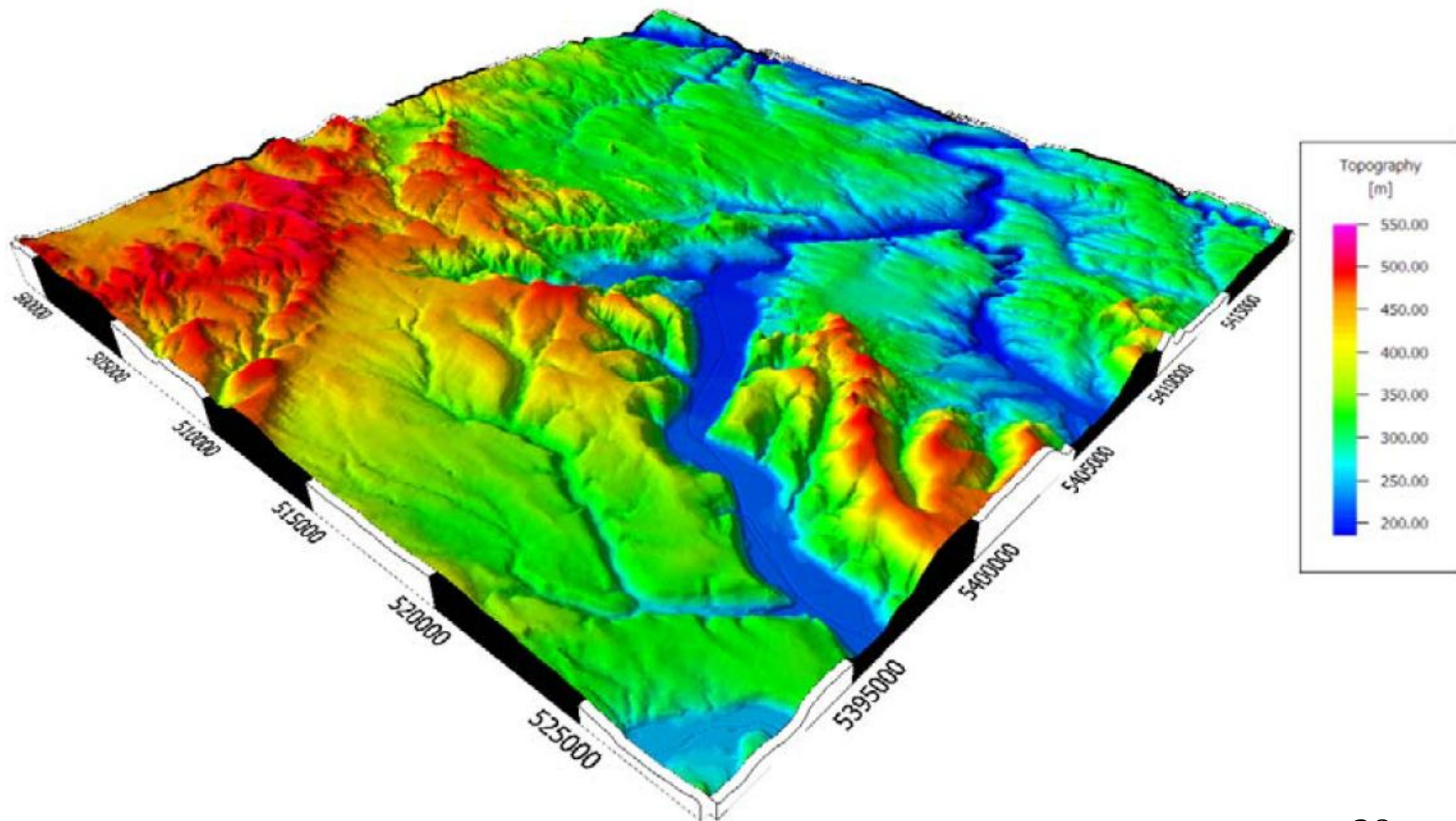
Модель *Stanford University Interim (SUI)*

| Параметр | Границы применения |
|--------------------------|--------------------|
| Рабочая частота, МГц | до 2000 |
| Протяженность трассы, км | 0,1 – 8 |
| Высота антенны БС, м | 10-80 |
| Высота антенны АС, м | 2-10 |

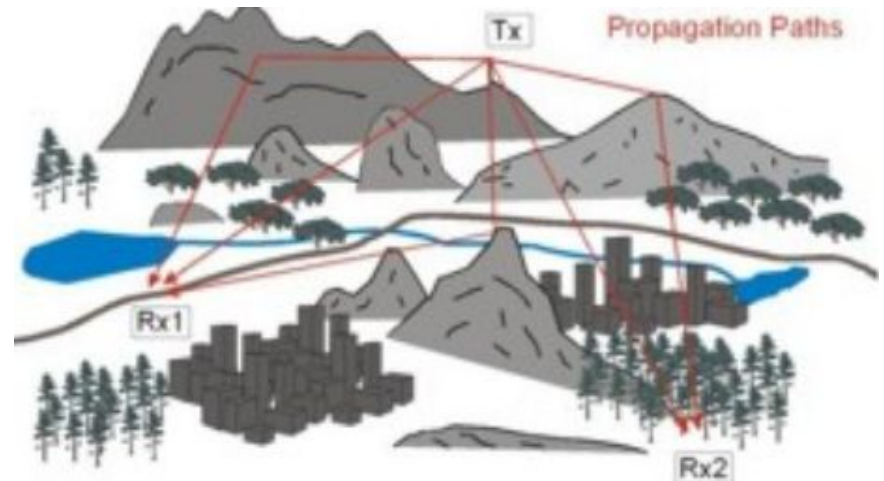
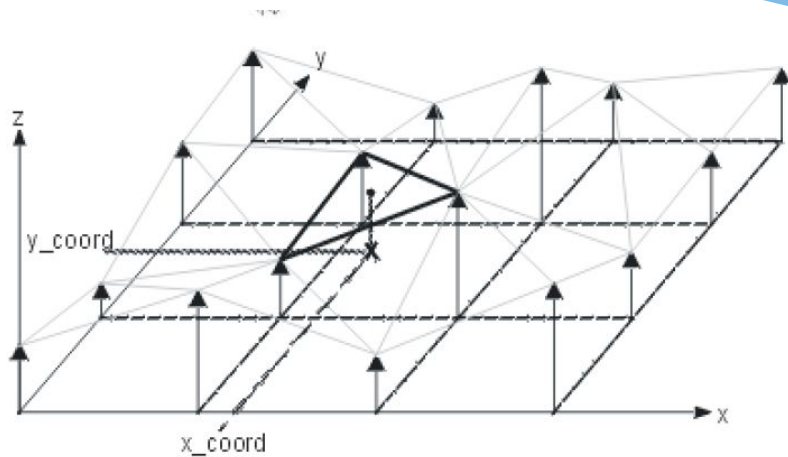
Заказные модели

Заказные модели основаны на модели Хата и ее модификациях, т.е. методом подбора постоянных коэффициентов достигается соответствие результатов теоретических расчетов и измерений для конкретной местности.

Топография векторных сценариев



Топография векторных сценариев



Типичный сценарий распространения, в котором учитывается топографические данные (рельеф и сведения о расположении населенных пунктов)

Область, покрытая растительностью



Ослабление сигналов растительностью

Электромагнитные волны при распространении в неоднородной лесной растительности:

- затухают в стволах, ветвях и листьях (иголках)
- рассеиваются на стволах, ветвях и листьях (иголках)
- дифрагируют на кромках элементов растительности и на вершинах лесного полога
- отражаются от лесной подстилки и от границ раздела: «уровень стволов – основание полога», «верхний уровень полога – воздух»
- отражаются от лесного массива (в случае вертикального и наклонного зондирования)

Ослабление сигналов растительностью

- приобретают тип боковой волны, при этом ЭМВ распространяются на малых расстояниях в лесу, далее проникают из леса и распространяются в виде боковой волны над пологом леса в воздухе, а затем проникают внутрь леса к приемной антенне
- изменяют поляризацию ЭМВ (возникает кроссполяризация ЭМВ)
- в общем случае приобретают многомодовый характер распространения

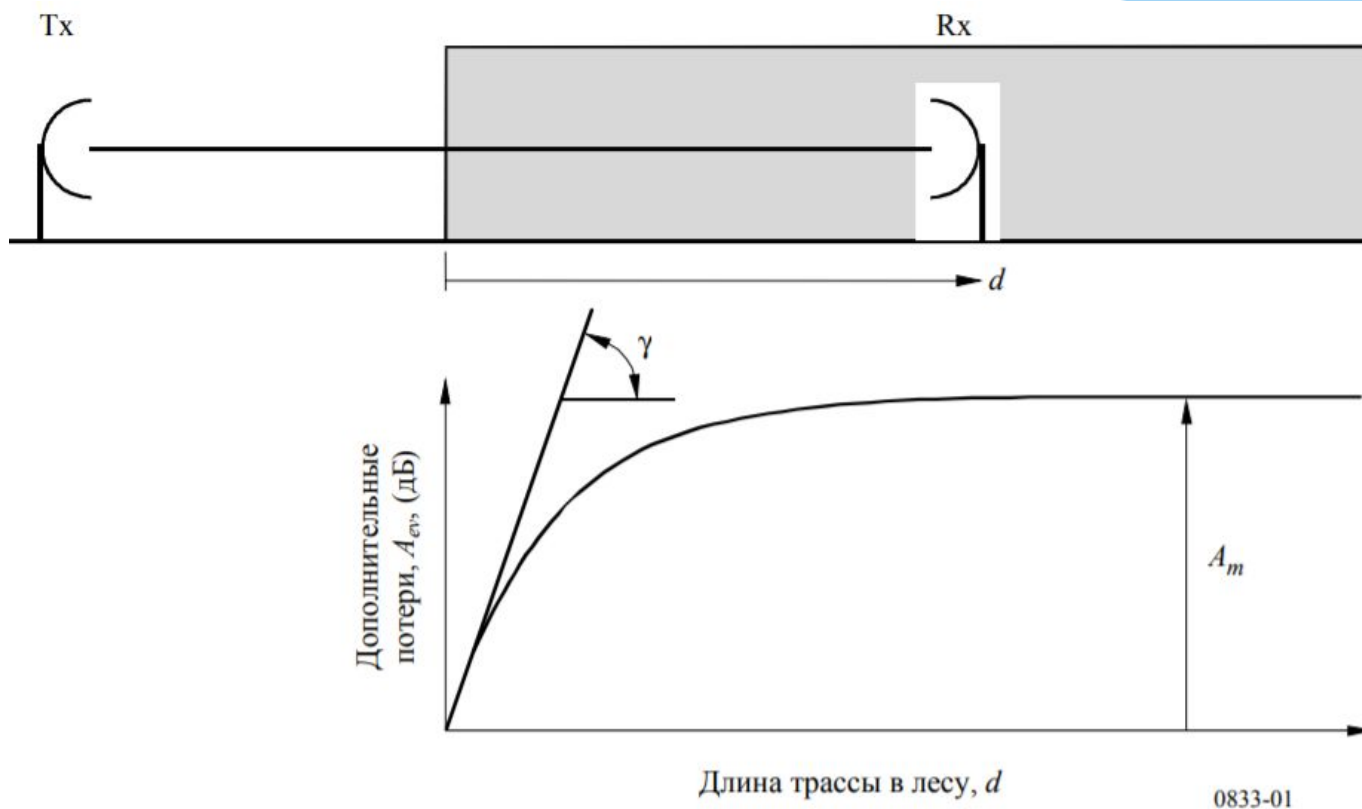
Ослабление сигналов растительностью

Построение строгой математической модели распространения радиоволн в лесном массиве с учетом всех перечисленных выше физических явлений практически невозможно.

Поэтому обычно теоретические исследования строятся на базе выделения нескольких характерных явлений и пренебрежении остальными.

Ослабление сигналов растительностью

Рекомендация МСЭ-R P.833



Ослабление сигналов растительностью

Рекомендация МСЭ-R P.833

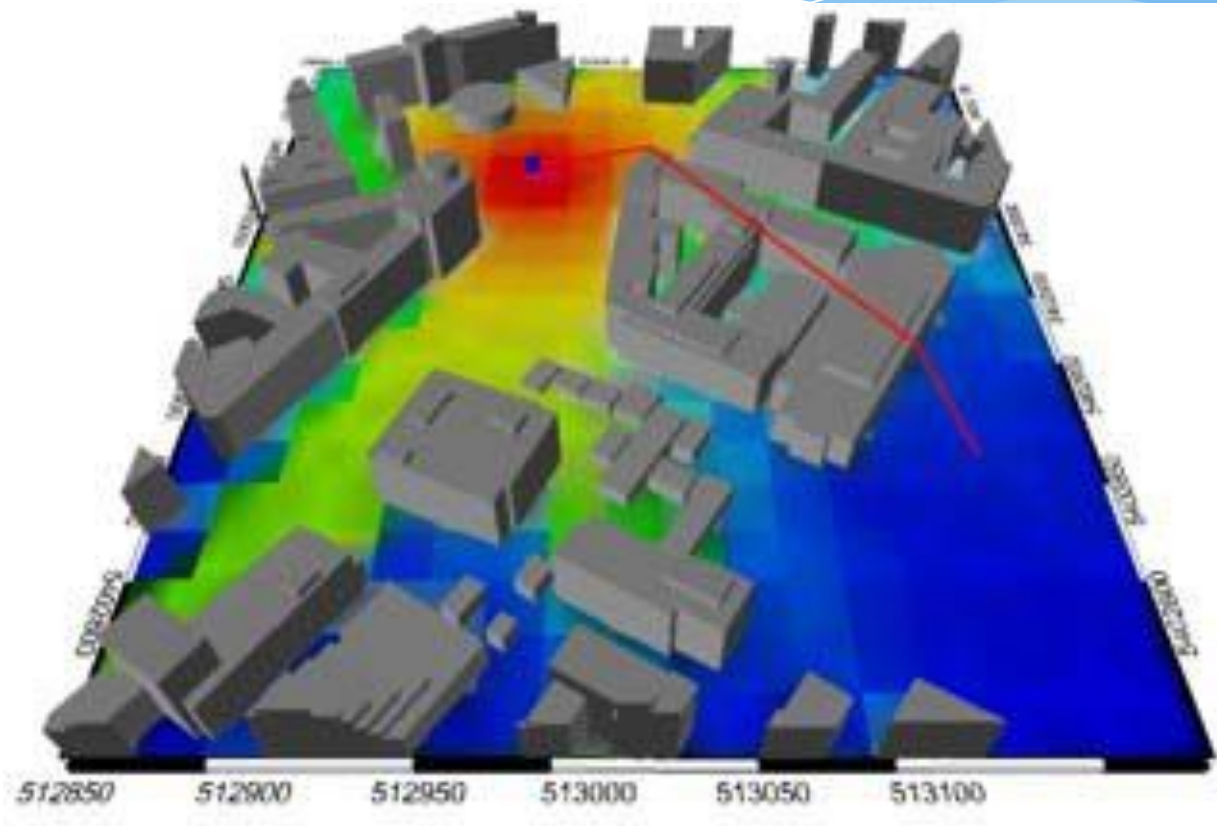
$$A_{ev} = A_m [1 - \exp(-d\gamma / A_m)]$$

где d — расстояние от кромки леса (м)

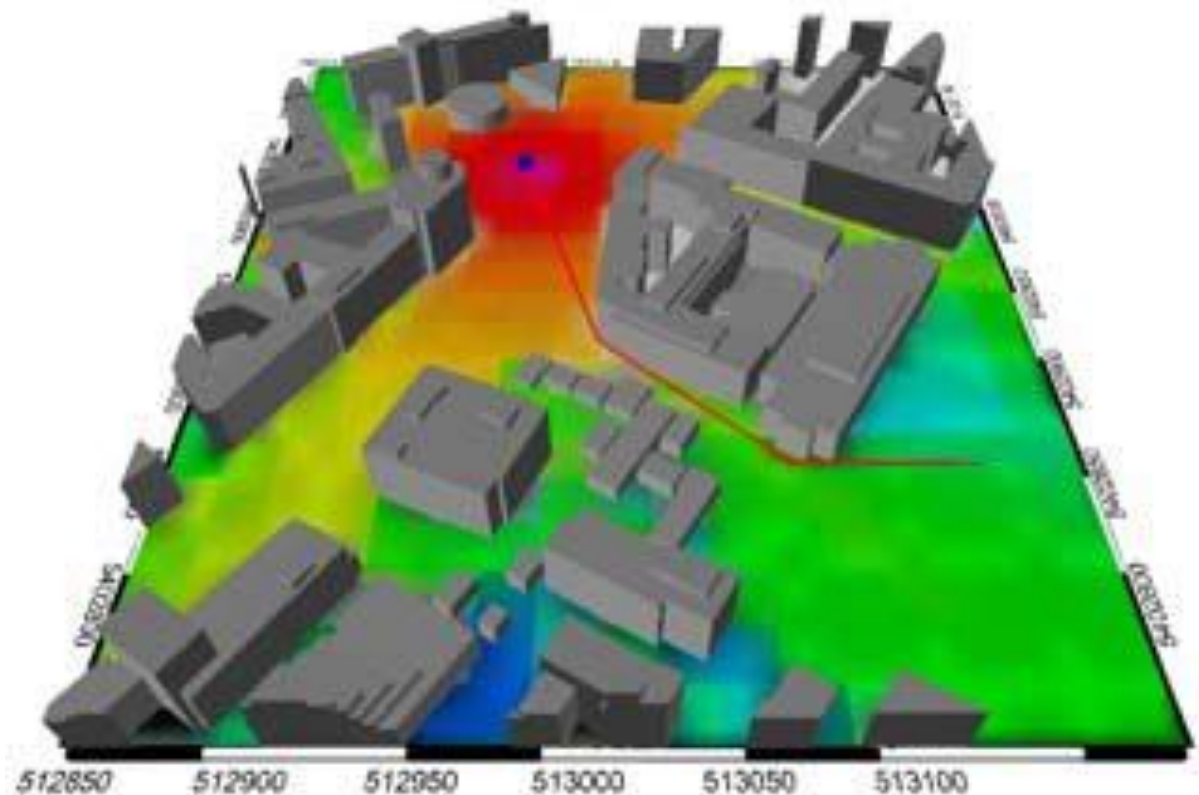
γ — погонное ослабление в растительности (дБ/м)

A_m — максимальное ослабление при определенном типе и дальности распространения в растительности (дБ)

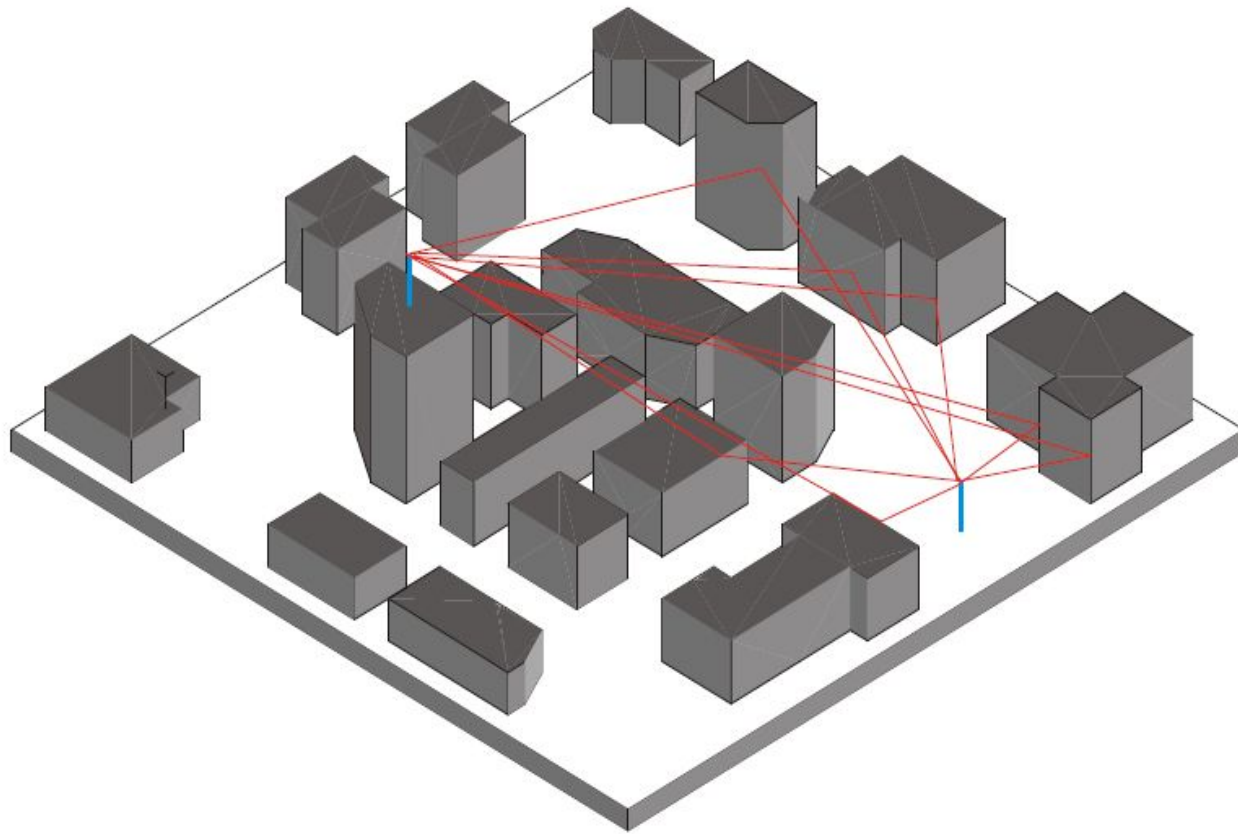
Propagation Models. COST 231 Walfisch-Ikegami



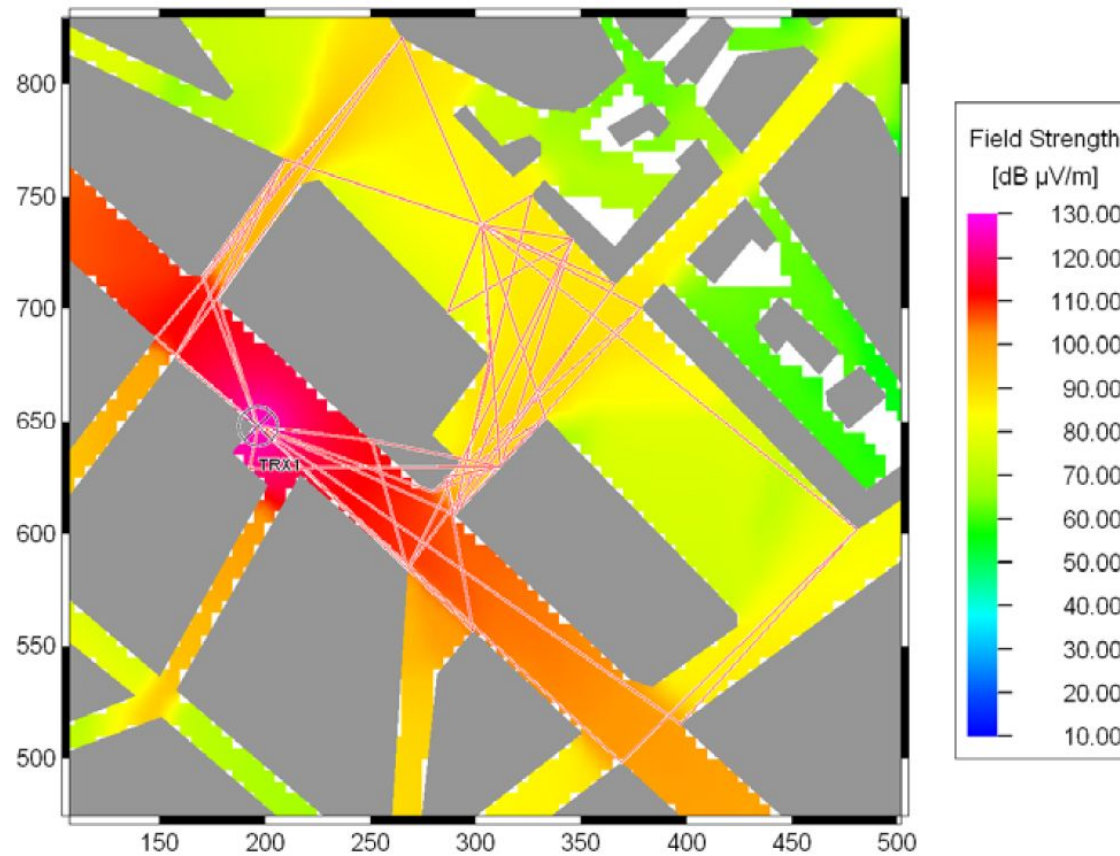
Propagation Models. Dominant Path Model



Ray Tracing. Multipath propagation

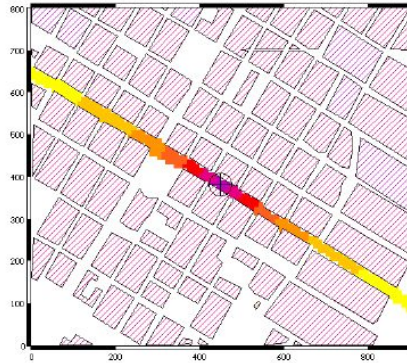


Ray Tracing. Field strength

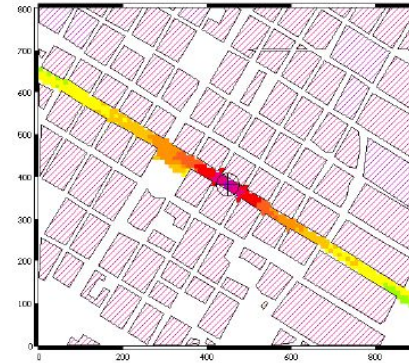


Ray Tracing

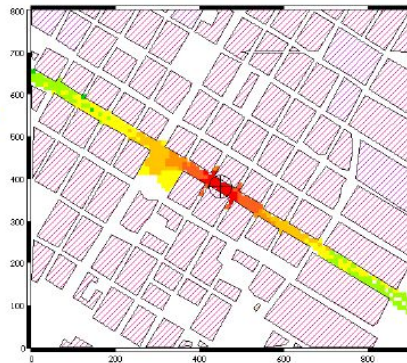
Direct



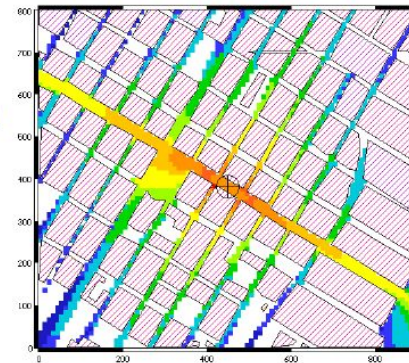
Single Reflection



Double Reflection

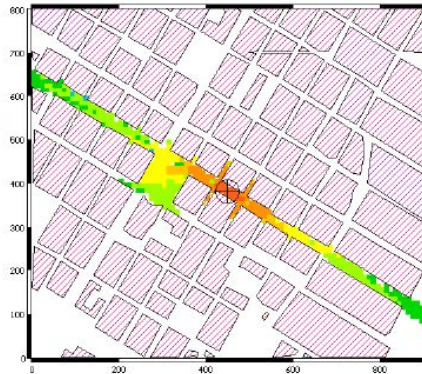


Single Diffraction

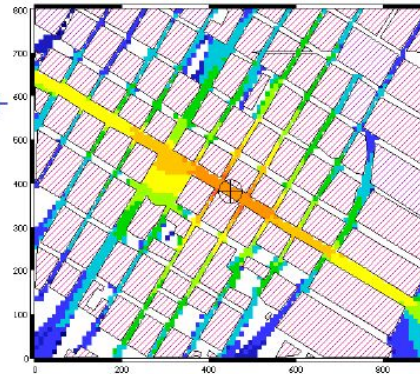


Ray Tracing

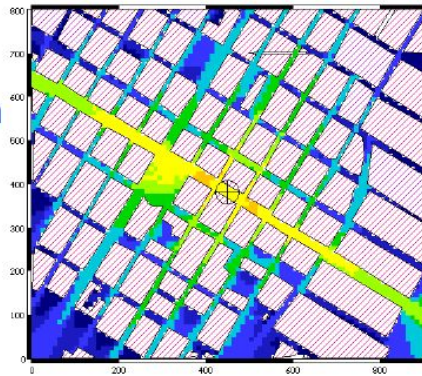
Triple
Reflection



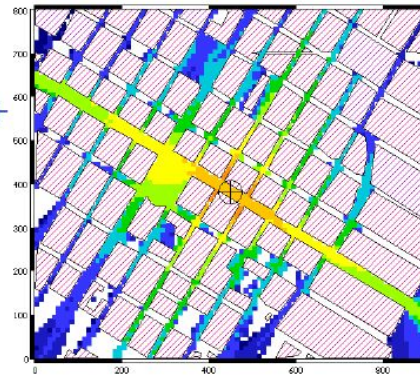
Single
Reflection +
Single
Diffraction



Double
Diffraction



Double
Reflection +
Single
Diffraction



Intelligent Ray Tracing (IRT)

