

2. Модель распространения радиоволн в условиях городской застройки

Несмотря на объективность воздействия канала распространения радиоволн на радиосигнал в пункте измерений его параметров, знание характера этого воздействия, очевидно, позволит выработать рациональную стратегию измерений. Один из способов получения этих знаний – моделирование канала распространения радиоволн.

В задаче – определение местоположения ИРИ в ОВЧ-УВЧ диапазоне, традиционно, оценка характера воздействия канала распространения радиоволн складывалась из трех аспектов: оценки затухания радиосигнала с выхода передатчика до входа приемника; оценки уровня суммарных шумов (помех) на входе приемника; наконец, оценки влияния отношения сигнал/шум (помеха) на точность измерения координатно-информативных параметров радиосигналов. Данная процедура сопровождалась одним существенным ограничением – предполагалось однолучевое распространение радиоволн, именно, с искомого направления до пункта приема. Как мы выяснили в п. 1.1. такое ограничение нельзя считать приемлемым для условий города, когда зачастую отсутствует прямая видимость между ИРИ и измерителем. Правомочно предположить, что суммарный радиосигнал в пункте измерений будет представлять собой сумму радиосигналов часто без явно доминирующего, приходящих в общем случае с разных направлений. Подобная модель нашла свое применение, например, в ВЧ диапазоне для случая преимущественно пространственного распространения радиоволн. В нашем случае ситуация усугубляется еще и тем, что помимо опасности столкнуться с глубокими замираниями радиосигнала, что характерно для многолучевого распространения радиоволн, могут иметь место случаи ошибочной классификации направления прихода сигнала при доминирующем луче с другого направления.

В связи с этим, уметь прогнозировать подобную ситуацию на основе моделирования условий распространения радиоволн до пунктов измерений в пространственно распределенной системе местоопределения, одновременно, с учетом факторов затухания и многолучевости представляется актуальным.

В результате моделирования в данном случае мы должны в широком смысле оценить влияние параметров распространения радиоволн в конкретных условиях размещения измерителей и ИРИ в городе на измеряемые первичные пространственно информативные параметры радиосигналов.

Процедура моделирования условий распространения радиоволн может быть востребована, как на этапе проектирования городской системы местоопределения, так и в ходе ее эксплуатации.

На этапе проектирования - учет результатов выполнения данной процедуры позволит, например, определить рациональный алгоритм обработки результатов измерений и выбрать места для развертывания измерителей.

В ходе эксплуатации на основании результатов моделирования могут быть выработаны рациональные управляющие воздействия в системе местоопределения, например, выбран рациональный состав подсети измерителей для конкретного, частного района сбора информации при их стационарном исполнении, либо рациональный маршрут перемещения подвижного измерителя относительно предполагаемого района размещения ИРИ.

2.1. Энергетическая модель городской трассы радиоконтроля

В общем случае энергетический расчет линий радиоконтроля предполагает три этапа: расчет мощности сигнала ИРИ в пункте приема (измерений); расчет мощности шумов в пункте приема; определение отношения сигнал/ шум в пункте приема и сравнение его с пороговым значением для принятия решения.

Расчет мощности сигнала осуществляется из известного [7] уравнения передачи (2.1).

$$P_{np} = P_{пер} - W_{фпер} + G_{пер} + G_{np} - W_{фnp} - W_T, \quad (2.1)$$

где P_{np} – мощность сигнала в пункте приема (измерений); $P_{пер}$ – мощность на выходе передатчика; $W_{фпер}$ – затухание в фидере передатчика; $G_{пер}$ – коэффициент усиления передающей антенны; G_{np} – коэффициент усиления приемной антенны; $W_{фnp}$ – затухание в фидере приемника (измерителя); W_T – коэффициент затухания на трассе распространения.

Мощность (шумов+помех) определяют из выражения [27]

$$P_{ш} = 10 \lg \left\{ K_b \cdot B \cdot [\eta \cdot T_{я} + T_0 (1 - \eta)] + 10^{0.1 P_{шст}} \right\}, \quad (2.2)$$

где K_b – постоянная Больцмана; B – ширина полосы пропускания приемника; η – КПД АФУ приемного тракта; $T_{я} = T_K + T_{и}$ – яркостная температура внешних шумов (здесь, T_K – температура шумов космического пространства, $T_{и}$ – температура шумов промышленных помех, T_0 – температура атмосферы); $P_{шст}$ – уровень стационарных помех.

С точки зрения энергетической части модели распространения радиоволн ОВЧ-УВЧ диапазона в городе принципиальное значение имеет процедура оценки коэффициента затухания на трассе распространения.

Известны три подхода [7] для оценки коэффициента затухания на трассе распространения в ОВЧ-УВЧ диапазоне:

- статистическая модель;
- детерминированная модель;
- дифракционно-аналитическая модель.

Статистическая модель [7, 24, 25] представляет собой уравнение для расчета напряженности поля сигнала с набором коэффициентов, каждый из которых учитывает определенные условия распространения. В их числе:

- коэффициент, зависящий от степени неровности местности;
- коэффициент, зависящий от высоты приемной антенны и характера местности в зоне приема;
- коэффициент, зависящий от процента пунктов приема, для которых напряженность поля превысит прогнозируемый уровень;
- коэффициент, зависящий от угла просвета местности;
- коэффициент, учитывающий климатические зоны.

В основном эти коэффициенты имеют сложные многофакторные зависимости, которые предлагается аппроксимировать иногда при значительном разбросе значений исходных параметров распространения.

Данная модель дает приемлемые для практики результаты на открытой местности в условиях прямой видимости между ИРИ и измерителем.

Детерминированная модель [7, 23] содержит вычисления напряженности поля в пункте приема на основе построения профиля трассы распространения, выделения на ней основных препятствий и аппроксимации их по определенным правилам. Причем для применения модели, необходимо выполнение следующих условий:

- наличие на пути распространения радиоволн не более двух клиновидных препятствий;
- недопустимость перекрытия первой зоны Френеля на участках распространения от антенны до препятствия и между препятствиями;
- допустимая ширина препятствия не должна превышать одной двадцатой от всей длины трассы распространения.

Насколько можно видеть, эти условия существенно сужают область применения данной модели. Данный подход наиболее применим для горных условий, но с учетом выполнения всех ограничений налагаемых на данную модель.

Дифракционно-аналитическая модель [7, 26] была разработана специально для расчетов затухания на трассах систем подвижной связи в городских и пригородных зонах. Она позволяет вести расчеты в широком диапазоне частот (до 3000 МГц), при удалении абонента от антенны базовой станции от сотен метров до единиц километров и для разных возвышений установки антенны базовой станции. Необходимо отметить, что модель в первую очередь предназначена для расчета затуханий на закрытых трассах, когда сигнал, приходящий от ИРИ, получается как результат сложной интерференции множества отраженных сигналов. Можно сказать, что дифракционная модель позволяет рассчитывать усредненные значения сигнала в точке приема в зависимости от характеристик городской застройки.

Для нашего случая в данной модели существует очень важная, с точки зрения практического применения, особенность, помимо параметров городской застройки, допускается варьировать значениями таких параметров, как высота подвеса антенны измерителя относительно высоты зданий и значение «погружения» ИРИ относительно высоты окружающих зданий.

Для практики местоопределения в городе интерес представляют два случая - измеритель находится на уровне крыш зданий (и несколько приподнят над ними) и измеритель находится на земле (на транспортном средстве).

Суммарные потери на трассе распространения радиосигнала от источника до измерителя при рассматриваемом подходе будут включать:

- затухание при распространении в свободном пространстве (W_0);
- затухание при дифракции от крыши ближайшего к ИРИ здания (W_{rd});
- затухание от множественной дифракции плоских волн, вызванной рядами зданий на трассе (W_{md}).

Рассмотрим особенности расчета перечисленных выше составляющих суммарного коэффициента затухания:

Затухание в свободном пространстве определяется из выражения

$$W_0 = -10 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (2.3)$$

где λ – длина волны ИРИ; R – расстояние от измерителя до ИРИ.

Затухание при дифракции от крыши ближайшего к ИРИ определяется из выражения

$$W_{rd} = -10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right], \quad (2.4)$$

где $r = \sqrt{(\delta h_m)^2 + x^2}$ – наклонная дальность (здесь, δh_m – среднее «погружение» относительно высоты окружающих зданий, x – расстояние от ИРИ до стенки ближнего, по направлению к измерителю, дому (в расчетах эта величина берется как половина ширины улицы); $\theta = \arctg(\delta h_m / x)$ – угол закрытия.

Затухание от множественной дифракции плоских волн, вызванной рядами зданий на трассе определяется из выражения

$$W_{md} = -10 \lg(Q_m^2), \quad (2.5)$$

где Q_m – сложная функция, зависящая от числа экранов m (домов, находящихся между ИРИ и измерителем), высоты подвеса антенны измерителя δh_b , среднего расстояния между улицами d и длины волны λ .

Общее выражение для расчета затухания на трассе распространения радиоволн определим для трех наиболее типовых и поэтому интересных с точки зрения практики вариантов подвеса антенны измерителя.

Антенна измерителя находится непосредственно на уровне крыш зданий $\delta h_b = 0$. Этот случай характерен для районов, застроенных однотипными зданиями равной высоты, а выражение для расчета суммарного затухания на трассе имеет вид:

$$W_{mp} = -10 \lg \left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi R}} \right)^2 - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 R} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left(\frac{d}{R} \right)^2, \quad (2.6)$$

В выражение (2.6) поправочный коэффициент $1/\sqrt{2}$ в первом слагаемом (для W_0) учитывает изменение структуры основного лепестка излучения антенны. Таким образом, затухание в данном случае возрастает пропорционально четвертой степени расстояния и третьей степени частоты.

Антенна измерителя приподнята на несколько метров над крышами зданий. В этом случае выражение для Q_m аппроксимируют формулой

$$Q_m \approx 2,35 \left(\frac{\delta h_b}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right)^{0,9}, \quad (2.7)$$

соответственно, затухание на трассе рассчитывается из выражения

$$W_{mp} = -10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 R} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[(2,35)^2 \left(\frac{\delta h_b}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right)^{1,8} \right] \quad (2.8)$$

Как следует из (2.8), затухание для такого варианта размещения измерителя и ИРИ приближенно возрастает как четвертая степень расстояния и как вторая степень частоты.

Антенна измерителя расположена ниже крыши дома. Этот случай $\delta h_b < 0$ можно рассматривать для расчетов затухания, когда и измеритель и ИРИ находятся на уровне земли. При этом процесс дифракции и отражений волн обусловлен противоположными стенами домов улиц, где находятся ИРИ и измеритель. Результирующее выражение для расчета затухания представляют в виде

$$W_{mp} = -10 \lg \left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi R}} \right)^2 - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 R} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left\{ \left[\frac{d}{2\pi(R-d)} \right]^2 \frac{\lambda}{(\delta h_b)^2 + d^2} \left(\frac{1}{\psi} - \frac{1}{2\pi + \psi} \right)^2 \right\}, \quad (2.9)$$

где $\psi = \arctg(-\delta h_b / d)$ - угол закрытия.

Отметим, что выражение (2.9) позволяет рассчитать потери в затененной области через один или несколько рядов зданий.

При формировании исходных данных для проведения расчетов необходимо учесть ряд ограничений речь идет об эмпирических формулах.

При расчете затухания для случая дифракции от крыши ближайшего к ИРИ здания, необходимо учитывать, что величина «погружения» δh_m не должна стремиться к нулю.

Для всех вариантов расчета длина волны должна находиться в пределах от 10 метров до 10 сантиметров (ОВЧ-УВЧ диапазон), расстояние от измерителя до ИРИ не менее 10 метров.

Расстояние от ИРИ до стенки ближнего здания должно иметь положительное не нулевое значение.

При "размещении" антенны измерителя ниже крыши дома необходимо исключить равенство расстояния от измерителя до ИРИ и среднего расстояния между улицами.

В целом, можно предположить, что изложенный подход наиболее применим для городских условий и может быть взят в основу энергетической части модели распространения радиоволн ОВЧ-УВЧ диапазона в городе.

С учетом сделанных замечаний и допущений предлагается следующая последовательность моделирования трассы радиоконтроля в городе, в части касающейся определения затухания радиосигнала, который распространяется по конкретному пути до пункта измерений.

- анализируется рельеф местности и определяются параметры застройки конкретной трассы радиоконтроля;

- формируются исходные данные (диапазон частот, параметры передающего тракта ИРИ и высота подъема его антенны, параметры измерителя и высота "подвеса" его антенны;

- определяется затухание на трассе распространения радиоволн и прогнозируемый уровень радиосигнала в пункте приема;

- рассчитывается мощность суммарных шумов на входе приемного устройства измерителя и определяется прогнозируемое отношение сигнал/шум на входе решающего устройства измерителя для принятия решения.

2.2. Модель трассы радиоконтроля в условиях многолучевости

Известная модель радиоканала в условиях многолучевости [31, 32] приведена рис.2.1.

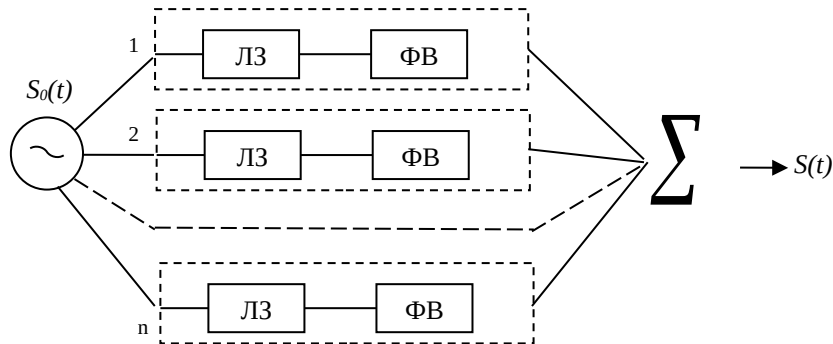


Рис 2.1.

Она предполагает, что сигнал от ИРИ

$$S_0(t) = a_0 \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_0)] , \quad (2.10)$$

где a_0 - амплитуда, f_0 - частота и φ_0 начальная фаза сигнала при прохождении через радиоканал, в пункте приема будет представлять собой в общем случае сумму n сигналов (лучей), которые распространялись по отличным радиотрассам. Последнее обстоятельство может быть смоделировано процедурами задержки сигнала и изменения его фазы в соответствии с выражением

$$S(t) = a_0 \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_0)) \sum_{i=1}^N \exp(-j2\pi f_0 \tau_i) , \quad (2.11)$$

где τ_i - время распространения i -го луча.

К ограничениям модели следует отнести:

- отсутствие учета затухания на трассе распространения каждого из n лучей;
- исключение процедуры оценки воздействия шума (помехи) на радиосигнал в пункте приема;
- наконец, не учет динамики изменения во времени значений затухания, задержки и фазы радиосигнала принимаемого с i -ой трассы, что очевидно будет иметь место, если ИРИ и (или) измеритель находятся в движении, либо меняется их окружение при условии размещения на земле даже в стационарном положении.

2.3. Обобщенная модель распространения радиоволн в условиях города

Приведенные для энергетической и многолучевой моделей ограничения и допущения в известной степени могут быть сняты в предлагаемой обобщенной модели распространения радиоволн в условиях города, схема которой представлена на рис. 2.2. Согласно схеме данная модель должна описывать ситуацию, когда сигнал $S_0(t)$ к каждому из M – датчиков поля в общем случае распространяется по n – путям. Как следует из рис. 2.2, сигнал на входе j -го датчика поля (антенного элемента) должен формироваться в результате моделирования процедур: затухания на трассе распространения i -го луча, задержки распространения, набега фазы, сложения n лучей и зашумления.

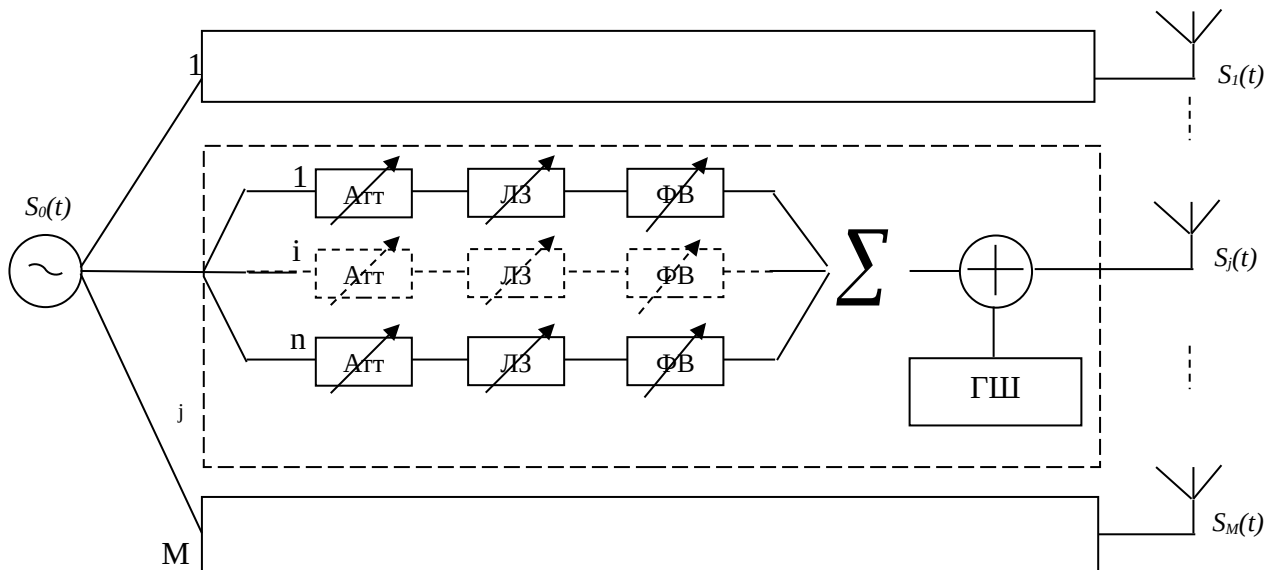


Рис. 2.2.

Модель распространения радиоволн формализуем для трех типовых для практики местоопределения в городе случаев: ИРИ и измеритель неподвижны; - ИРИ и измеритель неподвижны, но меняется их окружение; - ИРИ или измеритель находятся в движении.

В первом случае результирующее выражение для определения сигнала в j -ом антенном элементе может быть представлено в виде:

$$S_j(t) = a_0 \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_0)) \sum_{i=1}^n a_i \exp(-j2\pi f_0 \tau_i), \quad (2.15)$$

где a_i - коэффициент ослабления на трассе i -го луча и учета закона сохранения энергии.

Во втором случае - ИРИ и измеритель неподвижны, но меняется их окружение, что приводит к изменению во времени трасс распространения отдельных лучей, а следовательно, их затухания и задержки распространения, что следует из выражения

$$S_j(t) = a_0 \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_0)) \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(-j2\pi f_0 \tau_i(t)), \quad (2.16)$$

где $a_i(t)$ - коэффициент ослабления на трассе i -го луча и учета закона сохранения энергии, $\tau_i(t)$ - время распространения i -го луча.

Наконец в третьем случае, когда ИРИ или измеритель находятся в движении помимо условий оговоренных во втором – будет иметь место изменение фазы сигнала каждого из лучей в зависимости от скорости и направления движения. В первом случае результирующее выражение для определения сигнала в j -ом антенном элементе может быть представлено в виде:

$$S_j(t) = a_0 \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_0)) \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(-j2\pi f_0 \tau_i(t)) \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} Vt \cos(\theta_i)), \quad (2.17)$$

где λ - длина волны, V – скорость движения ИРИ (измерителя), θ_i - угол между направлением движения ИРИ и направлением прихода i -го луча.

Общая последовательность моделирования распространения радиоволн в городе от ИРИ ОВЧ-УВЧ диапазона до антенной системы измерителя в составе M – датчиков поля (антенных элементов) включает следующие процедуры (для каждого датчика поля):

- формируются координаты и параметры размещения ИРИ и измерителя, в том числе параметры их движения;
- формируются технические параметры ИРИ и измерителя, а также параметры для расчета мощности помех в пункте приема;
- задается возможные сектора в азимутальной и угломестной плоскостях прихода (излучения) лучей в точку приема и их количество. Предполагается что в заданных секторах лучи распределены равномерно;

- анализируется рельеф местности между ИРИ и измерителем, а также определяются параметры застройки в зоне существенной для распространения радиоволн на конкретной трассе радиоконтроля;

- для начального временного "среза" ($t=0$) определяются значения затухания на трассе распространения радиоволн в пункте приема для основного и других лучей в зависимости от варианта размещения ИРИ и антенны измерителя. Считается, что принципиальными с точки зрения переотражения (изменения направления прихода) являются препятствия в ближней зоне по отношению к ИРИ и (или) измерителю. После сравнения значения затухания по каждому лучу с пороговым значением уточняется количество лучей, формирующих результирующий сигнал на выходе датчика поля. Для каждого "существенного" луча определяется задержка распространения радиоволн.

- в случае, когда ИРИ и измеритель неподвижны для $t=0$ и последующих временных "срезов" прогнозируется результирующий радиосигнал (амплитуда и фаза) с использованием выражения 2.15;

- для второго случая на очередном временном "срезе" моделируется изменение окружения у ИРИ или измерителя, например, изменением их исходных координат случайным образом в пределах десятков длин волн и повторяются расчеты параметров отдельных лучей. Результирующий радиосигнал прогнозируется с использованием выражения 2.16. Таким образом, на каждом новом временном срезе фактически моделируется новая интерференционная картина;

- для третьего случая на каждом временном "срезе" определяются новые мгновенные координаты ИРИ или измерителя в зависимости от маршрута и скорости его движения. Результирующий радиосигнал прогнозируется с использованием выражения 2.17, которое позволяет учесть возможный доплеровский эффект;

- рассчитывается мощность суммарных шумов на входе j -го антенно-приемного тракта измерителя;

- для каждого временного "среза" определяется прогнозируемое отношение сигнал/шум и значения интересующих координатно-информативных параметров радиосигналов на входе j -го канала решающего устройства измерителя для принятия решения. Считается что j -й приемный тракт линейный и "нормально шумит" в согласованной с сигналом полосе пропускания.

Применять описанную модель следует с учетом следующих замечаний:

- во-первых, для проведения расчетов необходима высокоточная и достаточно подробная цифровая карта района сбора информации. При этом для расчета реальных трасс в городе необходимо использовать карты последних лет выпуска, учитывающие его изменяющуюся застройку;

- во-вторых, степень адекватности модели действительности зависит от уровня детализации при подготовке исходных данных в пространстве и времени, что находится в противоречии с достаточно большим объемом вычислений даже с использованием современных ПЭВМ.

Ниже рассмотрим результаты моделирования для условий г. Санкт-Петербурга для одной из типовых ситуаций, когда антенная система измерителя размещена на крыше доминирующего по высоте здания, а ИРИ размещен на автомобиле, который может находиться либо на стоянке, либо в движении.

На рис. 2.3, 2.4, 2.5, показана зависимость огибающих исходного и принимаемого сигнала от времени наблюдения (на интервале моделирования) для первого, второго и третьего случаев, соответственно, возможного совместного состояния ИРИ и измерителя.

$$|S_j(t)|$$

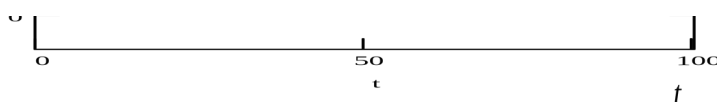


Рис. 2.3.

$S_j(t)$

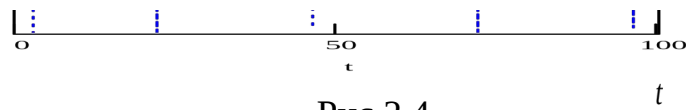


Рис.2.4.

$S_j(t)$

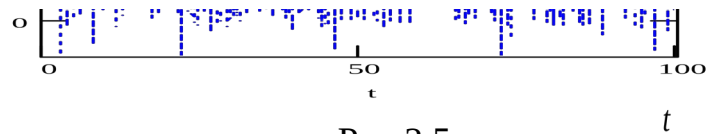
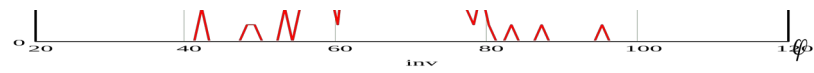


Рис 2.5.

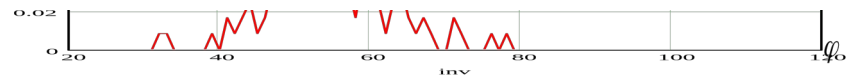
Как следует из рис. 2.3 - 2.5 для случаев, когда изменяется окружение ИРИ, либо когда последний находится в движении могут иметь место глубокие замирания сигнала.

Для случая, когда ИРИ находится в движении на рис. 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 приведена плотность вероятности распределения фазы сигнала в точке приема относительно фазы опорного канала приема (на выходе одного антенного элемента) для временных интервалов, соизмеримых с временем измерений (единицы-десятки миллисекунд), на рис 2.10 и 2.11, соответственно, показаны результирующие плотности распределений фазы и амплитуды сигнала (обозначены красным) на достаточно длительном временном интервале (сотни миллисекунд - единицы секунд).

$P(\varphi)$



$P(\varphi)$



$P(\varphi)$



$P(\varphi)$

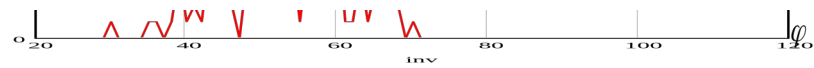


Рис. 2.9

$P(\varphi)$

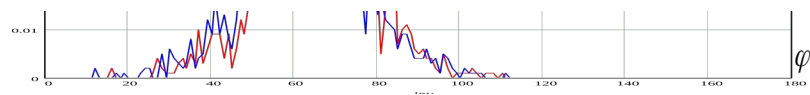


Рис. 2.10

$P(S(t))$

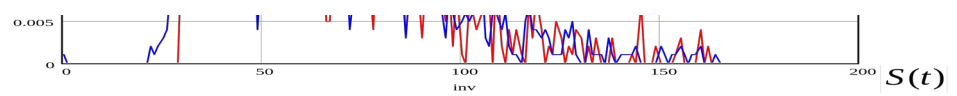


Рис. 2.11

Из рисунков 2.6-2.11 следует:

- во-первых, распределения первичных параметров в нашем случае фазы на отдельных интервалах измерений (отличных временных "срезах"), если не отличаются по виду, то, как правило, имеют различные первый и второй моменты, что подчеркивает нестационарность исследуемых случайных процессов;

во-вторых, результирующее распределение на длительном интервале вполне предсказуемо, а именно фаза распределена по нормальному закону, а амплитуда по закону Релея.

Устойчивость распределения фазы на длительных временных интервалах подтверждает возможность извлечения достоверной информации о ней если, например, временную статистику компенсировать статистикой пространственной (что подтверждено экспериментальными исследованиями).

Распределение амплитуды сигнала подчеркивает возможность наличия глубоких замираний в точке приема.

По результатам испытаний модели в условиях Санкт-Петербурга с применением цифровой карты города получен набор тематических карт, демонстрирующих работу модели в различных условиях. Например, на рис. 2.12. представлен результат моделирования радиотрассы между антенной измерителя, находящейся на крыше здания, на мачте 3 метра и подвижным ИРИ работающем на частоте 900 МГц. Мощность излучения 2 ватта, скорость движения 60 км/ч.

На фрагменте карты города (рис. 2.12.) проиллюстрированы результаты расчета затухания на трассах распространения радиоволн от ИРИ, который перемещается на автомобиле в районе размещения измерителя. Различная интенсивность цвета транспортных магистралей соответствует различной энергетической доступности. При этом максимальная интенсивность к северо-западу от измерителя указывает на минимальное затухание на трассах радиоконтроля.



Рис 2.12.

2.4. Анализ адекватности, чувствительности и надежности модели

Исследование модели на адекватность осуществлялось путем сопоставления полученных в ходе моделирования результатов с данными экспериментальных исследований. Сравнение результатов моделирования и эксперимента проводилось для одного из стационарных измерителей из состава межведомственной системы радиоконтроля в г. Санкт-Петербурге на рис. 2.13.

Сравнение проводилось для трех оговоренных в настоящем разделе случаев: измеритель, источник излучения их окружение; измеритель и источник излучения неподвижны, но меняется их окружение; измеритель неподвижен, а источник находится в движении.

Варьируемыми параметрами считалась частота излучения. Количество испытаний - 1000. Результаты моделирования для частоты излучения 100 МГц представлены на рис.2.10 и 2.11.

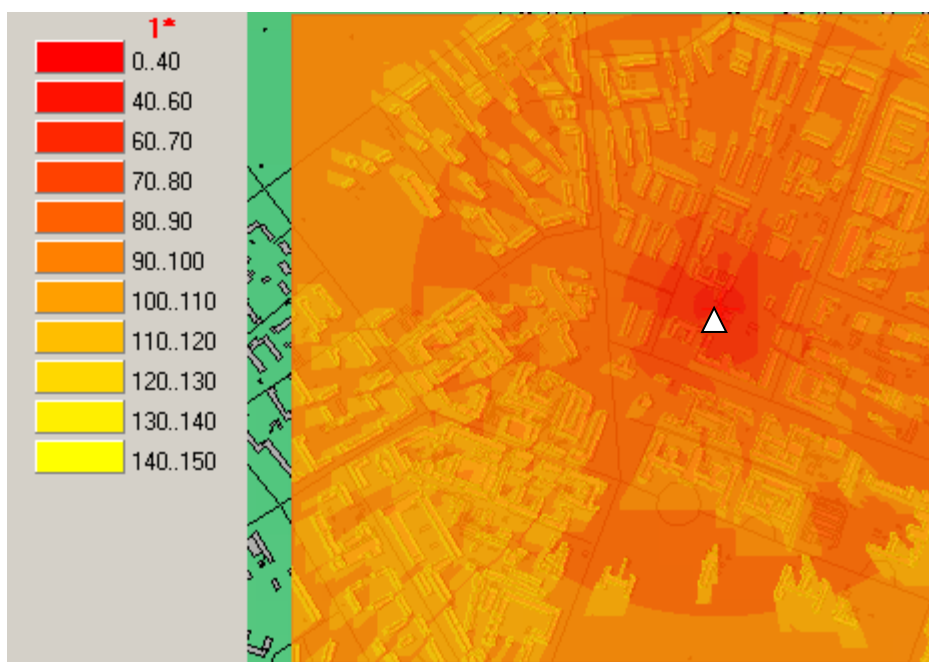


Рис. 2.13.

На графиках представлены, как уже отмечалось, функции плотности вероятности распределения координатно-информативных параметров

(амплитуды сигнала принимаемого одним из антенных элементов – рис. 2.11. и разности фаз между сигналами, принимаемого двумя антенными элементами, расположенными в одной плоскости на удалении 0.51 метра - рис. 2.10). Красным цветом выделены результаты моделирования, синим – результаты экспериментальных измерений для второго случая. Результаты, полученные в ходе моделирования, в части касающейся разности фаз составили: математическое ожидание 65.587; среднеквадратическое отклонение 19.634; эксцесс -0.239; коэффициент асимметрии -0.046. По результатам эксперимента получены, соответственно, следующие результаты: 62.547; 15.334; 0.021; 0.033

Из полученных результатов можно сделать вывод, что закон распределения разности фаз сигналов; принимаемых двумя антенными элементами (датчиками поля) нормальный с математическим ожиданием 65 градусов и СКО 19 градусов. Коэффициент корреляции функций плотности распределения по результатам моделирования и эксперимента составил 0.92.

Результаты, полученные в ходе моделирования, в части касающейся амплитуды сигнала, составили: математическое ожидание 67.798; среднее квадратическое отклонение 28.205; эксцесс -3.98; коэффициент асимметрии - 1.217. По результатам эксперимента, соответственно, получены следующие результаты: 70.731; 28.487; 3.993; 1.17.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что закон распределения амплитуды сигнала принимаемого антенным элементом (датчиком поля) близок к распределению Релея. Коэффициент корреляции функций плотности распределения по результатам моделирования и эксперимента составил 0.877.

Результаты моделирования и измерений для частот 100, 300, 900, 2700 МГц, для трех рассматриваемых случаев представлены в таблицах 2.1. (для распределения амплитуды принимаемого сигнала) и 2.2. (для распределения разности фаз).

Таблица 2.1.

Частота	Номер эксп.	$M_{\text{мод}}/M_{\text{изм}}$	$CKO_{\text{мод}}/CKO_{\text{изм}}$	K
100 МГц	1	89.8/92.5	1.3/4.9	0.51
	2	67.8/70.7	28.2/28.5	0.88
	3	52.9/55.8	12.9/14.3	0.84
300 МГц	1	83.2/86.01	1.05/4.95	0.55
	2	62.9/66.0	20.6/20.9	0.92
	3	49.3/52.2	4.4/6.8	0.81
900 МГц	1	81.01/83.7	0.98/4.92	0.53
	2	58.8/62.01	4.91/7.16	0.86
	3	46.48/46.9	2.01/2.6	0.78
2700 МГц	1	80.2/81.2	0.95/2.2	0.58
	2	53.1/54.1	2.4/3.8	0.87
	3	45.08/45.9	1.6/2.2	0.75

Таблица 2.2

Частота	Номер экс.	$M_{\text{мод}}/M_{\text{изм}}$	$CKO_{\text{мод}}/CKO_{\text{изм}}$	K
100 МГц	1	65.04/63.0	0.99/4.9	0.6
	2	65.6/62.55	19.6/15.3	0.92
	3	66.1/63.4	27.3/22.4	0.87
300 МГц	1	-179/-177	0.9/4.5	0.67
	2	-178/-178.5	18.4/14.9	0.90
	3	180/-179.5	24.7/21.9	0.85
900 МГц	1	-72/-75	0.87/3.8	0.65
	2	-73/-74	15.5/13.1	0.89
	3	-74/-73	21/18.4	0.83
2700 МГц	1	38/38.7	0.82/2.9	0.71
	2	38.5/37.9	11/9.8	0.87
	3	37.5/38.1	14/11.5	0.81

Анализ данных, представленных в таблицах, позволят констатировать достаточно высокую адекватность модели. Наихудшее совпадение получилось в случае, когда неподвижны измеритель, ИРИ и их окружение. Данное обстоятельство можно объяснить, что исключить изменения окружения ИРИ, который находится у земле, на реальной трассе распространения радиоволн в городских условиях практически сложно.

Выявленные по результатам моделирования законы распределения основных координатно-информативных параметров сигналов на городских трассах радиоконтроля в целом подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Под надежностью разработанной модели будем понимать степень соответствия получаемых при моделировании результатов теоретическим представлениям.

Необходимо отметить, что полученные в результате моделирования законы распределения основных координатно-информативных параметров используются в теории распространения радиоволн для описания многолучевого канала распространения радиосигнала, который, очевидно имеет место на закрытых трассах радиоконтроля в ОВЧ-УВЧ диапазоне (размеры препятствий много больше длины волны). В то же время характерно для города постоянно меняющееся окружение ИРИ (измерителя), если он находится у поверхности земли, приводит к динамичному изменению трассы распространения, и как следствие, к изменению затухания на ней, поэтому значение данного параметра распространения объективно зависит от времени. Более того, функцией времени, очевидно, будет и задержка распространения радиосигнала, поскольку зависит от протяженности трассы луча и диэлектрических свойств препятствий на его пути.

Чувствительность модели характеризует ее свойство сохранять устойчивые значения оцениваемых параметров в определенном диапазоне изменения исходных данных. Оценка чувствительности позволяет

созмерить методические погрешности, полученные при огрублении модели, с неточностями задания исходных данных и допустимыми отклонениями оцениваемых параметров. Заметим, что огрубление модели часто вынужденная мера с целью сокращения времени моделирования. Проведенный анализ адекватности и надежности модели подтверждает ее удовлетворительную чувствительность к основным группам исходных данных (табл. 2.1, 2.2). Поэтому ограничимся рассмотрением чувствительности модели по отношению к одному параметру - количеству испытаний.

При малом количестве испытаний (менее 100) отмечалось существенное снижение адекватности полученных в ходе моделирования параметров реальным измерениям, в том числе нельзя было установить закон распределения. В свою очередь увеличение числа измерений более 1000 не приводило к существенному изменению оцениваемых параметров распределений. Данные обстоятельства позволяют определить рациональный объем испытаний по критерию: адекватность – продолжительность моделирования.

Выводы по разделу.

1. На основе анализа известных моделей распространения радиоволн, в том числе предусматривающих расчет напряженности поля в пункте приема в условиях потерь в канале распространения или наличия многолучевости, сформулированы их преимущества и ограничения в условиях города. Показано, что каждая из моделей при частном применении не может претендовать на адекватность для городских условий распространения радиоволн.

2. Предложена обобщенная модель распространения радиоволн в условиях городской застройки, в которой объединены энергетическая часть расчета на основе дифракционно-аналитического подхода с идеей многолучевости распространения на закрытых трассах, характерных для

ОВЧ-УВЧ диапазона в городе. Показано, что в предложенной модели снимаются в определенной степени ограничения частных моделей.

3. На основе результатов моделирования подтверждена в общем случае нестационарность во времени процесса измерений координатно-информативных параметров радиосигналов на городских трассах радиоконтроля. Вместе с тем, установлено на примере распределений амплитуды и разностей фаз, что результирующие распределения на достаточно длительном интервале вполне предсказуемы, при этом в первом случае речь идет о распределении Релея, а во втором о нормальном распределении. На основе экспериментальных данных сделано предположение о возможности компенсировать временную статистику за счет пространственной.

4. На основе сравнения результатов моделирования и экспериментальных исследований подтверждены адекватность, надежность и уточнены условия чувствительности предложенной модели распространения радиоволн в условиях города.