

УДК 621.396.98.004.1

О ВЛИЯНИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ГОРОДЕ ПРОФИЛЯ ЕГО ЗАСТРОЙКИ

Д.А.ЗАТУЧНЫЙ, Ж.В. СЛАДЬ

В статье исследуется влияние на распространение радиоволн в городских условиях высоты и плотности застройки. Приводится модель распространения радиоволн с борта воздушного судна. Приведены графики зависимости вероятности прихода сигнала от ВС от высоты полёта и среднего числа зданий.

Ключевые слова: вероятность прихода отражённой волны, среднее значение поля в точке приёма, интенсивность поля.

1. Введение

В пределах прямой видимости погрешности, связанные со средой распространения сигнала, как правило возникают там, где имеется неблагоприятный рельеф местности. Например, для случая, когда высота подвеса передающей антенны равна 200 м, среднее значение напряжённости поля в зоне городской застройки окажется на 10-12 дБ ниже, чем на открытом пространстве, а уменьшение высоты вдвое приводит к увеличению затухания на 6 дБ. Дополнительное затухание зависит от поляризации излучения, свойств строительных материалов и расположения зданий.

Крупные строения, размеры которых во много раз превышают длину волны, создают обширные теневые зоны, а рассеянные и отражённые волны придают процессу распространения радиоволн в городе существенно многолучевой характер и формируют сложную интерференционную структуру поля с глубокими и резкими пространственными замираниями. Это создаёт значительные трудности как для прогноза условий работы радиосредств, так и для обеспечения надёжной радиосвязи, особенно в системах широкополосной цифровой связи и при связи с подвижными объектами.

2. Модель распространения радиоволн в городе

В случае передачи сигнала с борта ВС основной вклад в формирование принимаемого сигнала, как следует из [1], вносят однократно рассеянные волны. Их число является случайной величиной, распределённой по закону Пуассона, единственным параметром которого является среднее число наблюдаемых точек отражения \bar{N} , т.е. вероятность прихода N отражённых волн определяется формулой

$$P(N) = \frac{(\bar{N})^N}{N!} e^{-\bar{N}}. \quad (1)$$

Введём величину: $P_1 = 1 - e^{-\bar{N}}$ [2]. Величина P_1 определяет вероятность прихода в точку наблюдения однократно отражённых волн. Значение P_1 следует рассматривать как нижнюю границу при оценке вероятности прихода однократно отражённых волн. На рис. 1 приведены зависимости вероятности P_1 от расстояния между ВС и пунктом приёма данных при значениях высоты ВС, равных 300м (кривая 1), 400м (кривая 2), 500м (кривая 3), 600м (кривая 4).

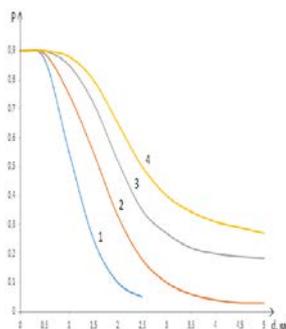


Рис.1. Зависимость вероятности приёма отражённых волн от расстояния между ВС и пунктом приёма данных

Как видно из рис.1., вероятность прихода отражённых волн уменьшается с увеличением расстояния между ВС и пунктом приёма данных. При этом эта зависимость нелинейная.

Измерения показали, что мощность сигнала убывает обратно пропорционально кубу расстояния на дальностях до 15-20 км. Последующее увеличение дальности приводит к более быстрому уменьшению уровня сигнала. На радиальных улицах уровень сигнала на 10-15 дБ выше, чем на поперечных, по отношению к трассе. Однако это отношение зависит от расстояния: различие уменьшается при увеличении дальности. Следует отметить, что при увеличении расстояния возрастает роль волны, распространяющейся над городской застройкой. Её вклад становится определяющим на расстояниях, превышающих 1,5-2 км, и зависит от углов укрытия ВС и пункта приёма данных, создаваемого близко расположенными зданиями.

Как правило, отражающие поверхности зданий являются существенно неоднородными из-за наличия окон, балконов и других элементов, которые имеют ещё и различные электрические свойства. Приближённо отражающие поверхности зданий описываются комплексным коэффициентом отражения с фазой, равномерно распределённой в интервале $[0, 2\pi]$, и масштабами корреляции в горизонтальном l_r и вертикальном l_b направлениях. Таким образом, поверхности зданий можно рассматривать как амплитудно-фазовые экраны, которые широко используются для описания процесса рассеяния на статистически неоднородной поверхности зданий [3]. Сама поверхность не является непрерывной, а состоит из множества амплитудно-фазовых экранов конечных размеров, случайно и независимо расположенных на поверхности земли, т.е. рассеивающая поверхность – это множество дискретных статистически независимых амплитудно-фазовых экранов.

Пусть рельеф городской застройки описывается некоторой случайной поверхностью S . Поле над поверхностью согласно теореме Грина можно представить в виде интегрального уравнения, приведённого в [4]:

$$U(r_2) = U_i(r_2) + \int_S \left\{ U(r_s) \frac{\partial G(r_2, r_s)}{\partial n_s} - G(r_2, r_s) \frac{\partial U(r_s)}{\partial n_s} \right\} dS, \quad (2)$$

где $U_i(r)$ - поле излучения; G – функция Грина; n_s - нормаль к поверхности S в точке r_s .

Поверхность S образуется горизонтальной плоской поверхностью земли S_1 и случайной поверхностью S_2 , являющейся совокупной поверхностью множества объектов городской застройки, ортогональных к S_1 и расположенных на ней случайным образом. Функция Грина $G(r_2, r_1)$ строится в следующем виде [3,4]:

О влиянии на распространение радиоволн в городе профиля его застройки

$$G(r_2, r_1) = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{e^{ik|r_2-r_1|}}{|r_2-r_1|} - \frac{e^{ik|r_2-r_1'|}}{|r_2-r_1'|} \right\}, k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

где r_1 - точка нахождения источника излучения, r_1' - точка, зеркальная с r_1 относительно поверхности земли S_1 ; r_2 - точка приёма сигнала, λ - длина волны излучения.

Считая, что волна, излученная источником, расположенным в точке r_1 , описывается с учётом влияния земли формулой (3), преобразуем соотношение (2) к виду:

$$U(r_2) = G(r_2, r_1) + \int_S \left\{ U(r_s) \frac{\partial G(r_2, r_s)}{\partial n_s} - G(r_2, r_s) \frac{\partial U(r_s)}{\partial n_s} \right\} dS. \quad (4)$$

В (4) функция Грина определена формулой (3) и, таким образом, исключено интегрирование по S_1 . Граничные значения $U(r_s)$ и $\frac{\partial U(r_s)}{\partial n_s}$ включают вклад падающего

$U_i(r_s)$ на элемент dS и отражённого (рассеянного) $U_r(r_s)$ излучений. Поскольку объект городской застройки непрозрачен, то на его обращённую к ВС сторону может упасть излучение $U_i(r_s)$, приходящее только из той части полупространства, где находится ВС. Интеграл в (4) таков, что в этом случае

$$\int_{S_2} \left\{ U_i(r_s) \frac{\partial G(r_2, r_s)}{\partial n_s} - G(r_2, r_s) \frac{\partial U_i(r_s)}{\partial n_s} \right\} dS = 0.$$

Под $U_r(r_s)$ подразумевается излучение, рассеянное той стороной экрана, которая обращена к ВС. Таким образом,

$$U(r_2) = G(r_2, r_1) + \int_{S_2} \left\{ U(r_s) \frac{\partial G(r_2, r_s)}{\partial n_s} - G(r_2, r_s) \frac{\partial U_r(r_s)}{\partial n_s} \right\} dS,$$

или это соотношение можно представить в виде:

$$U(r_2) = G(r_2, r_1) + 2 \int_{S_2} U_r(r_s) (n_s \nabla_s) G(r_2, r_s) dS,$$

$$\text{где } \nabla_s = \left(\frac{\partial}{\partial x_s}, \frac{\partial}{\partial y_s}, \frac{\partial}{\partial z_s} \right).$$

Значение $U_r(r_s)$ определим как произведение коэффициента $R(\varphi_s, r_s)$ отражения на граничное значение падающего излучения $U_i(r_s)$ и на функцию затенения $Z(r_2, r_s, r_1)$, которая равна единице, если точка r_s видна из точек r_2 и r_1 одновременно, и нулю во всех остальных случаях. В приближении однократного рассеяния запишем последнюю формулу в следующем виде:

$$U(r_2) = Z(r_2, r_1) G(r_2, r_1) + 2 \int_{S_2} Z(r_2, r_s, r_1) R(\varphi_s, r_s) G(r_s, r_1) (n_s \nabla_s) G(r_2, r_s) dS,$$

$$\sin \varphi_s = \left(n_s \frac{r_s - r_1}{|r_s - r_1|} \right).$$

Как приведено в [4]:

$$(n_s \nabla_s) G(r_2, r_s) \approx ik \left(n_s \frac{r_2 - r_s}{|r_2 - r_s|} \right) G(r_2, r_s) = ik \sin \psi_s G(r_2, r_s).$$

С учётом последнего соотношения перепишем выражение для поля $U(r_2)$ в виде:

$$U(r_2) = Z(r_2, r_1)G(r_2, r_1) + 2ik \int_{S_2} Z(r_2, r_s, r_1)R(\varphi_s, r_s) \sin \psi_s G(r_2, r_s)G(r_s, r_1) dS.$$

3. Исследование влияния профиля городской застройки на вероятность приёма сигнала непосредственно от ВС

Предположим, что отражающие свойства зданий случайны и независимы, но статистически одинаковы; значения коэффициента отражения комплексны, причём фаза с равной вероятностью может принимать любые значения на интервале $[0, 2\pi]$, так что среднее значение $\langle R(\varphi_s, r_s) \rangle = 0$. Это приводит к тому, что для $U(r_2)$ после усреднения по отражающим свойствам и положению всех зданий можно записать выражение:

$$\langle U(r_2) \rangle = \langle Z(r_2, r_1) \rangle G(r_2, r_1) = P_{21} G(r_2, r_1), \quad (5)$$

где P_{21} - вероятность приёма сигнала непосредственно от ВС.

Таким образом, среднее значение поля в точке приёма при распространении радиоволн в условиях города будет определяться вероятностью приёма сигнала непосредственно от ВС.

Средняя интенсивность поля над городской застройкой равна сумме интенсивности $\langle I \rangle$ рассеянных волн и интенсивности когерентной волны $\langle I_k \rangle$, приходящей непосредственно от ВС, при расчёте которой нужно учитывать вероятность прямой видимости между ВС и пунктом приёма данных.

В рамках модели статистически однородного городского района со средней высотой h застройки вероятность прямой видимости между ВС, находящимся в точке с координатами $r_1(x_1, y_1, z_1)$ и пунктом приёма данных, находящимся в точке $r_2(x_2, y_2, z_2)$ при $0 < z_1, z_2 < h$ определяется выражением, приведённым в [1]:

$$P(r_1, r_2) = \exp\left(-\gamma_0 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}\right),$$

Высота слоя городской застройки принята равной 20 м; $\gamma_0 = 6 \text{ км}^{-1}$.

При $0 < h < z_2$ и $z_1 > z_2$ как показано в [1]:

$$P(r_1, r_2) = \exp\left(\gamma_0 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \frac{h - z_2}{z_1 - z_2}\right).$$

График зависимости вероятности прямой видимости от среднего числа зданий приведена на рис.2.

Зависимость вероятности прямой видимости от высоты полёта ВС приведена на рис.3.

Зависимость вероятности прямой видимости от расстояния между проекциями на плоскость земли точек расположения ВС и пункта приёма данных приведена на рис 4.

О влиянии на распространение радиоволн в городе профиля его застройки

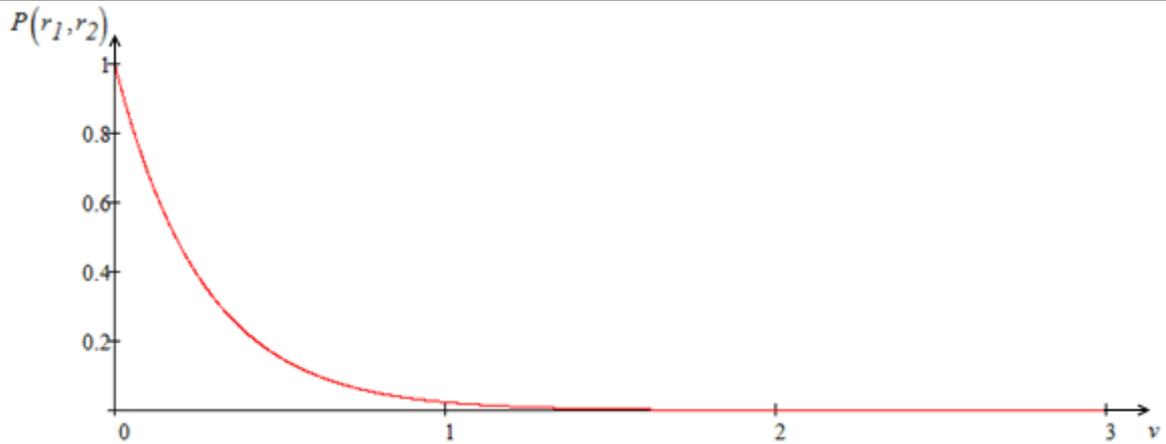


Рис. 2. Зависимость вероятности прямой видимости от среднего числа зданий

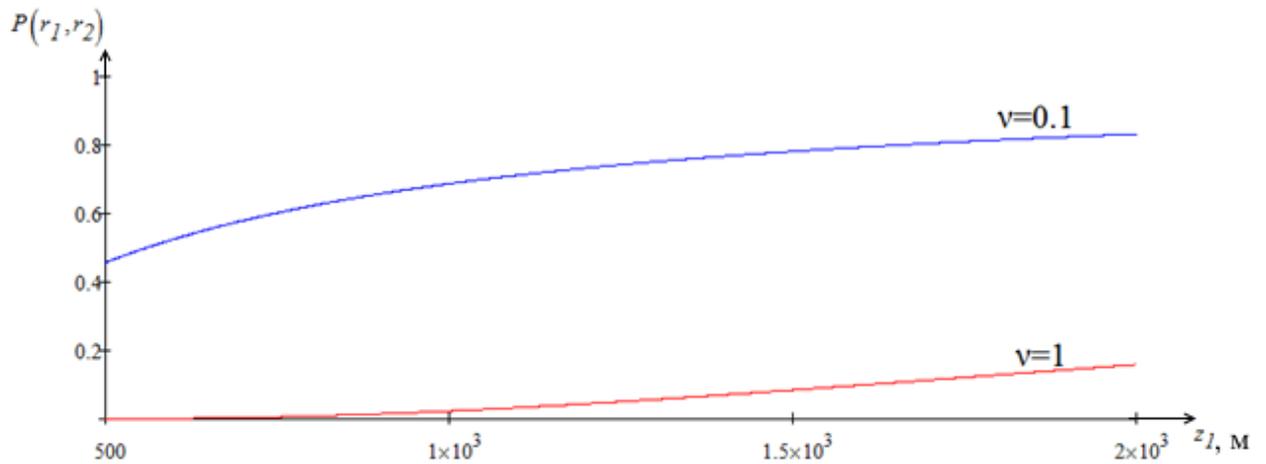


Рис. 3. Зависимость вероятности прямой видимости от высоты полёта ВС

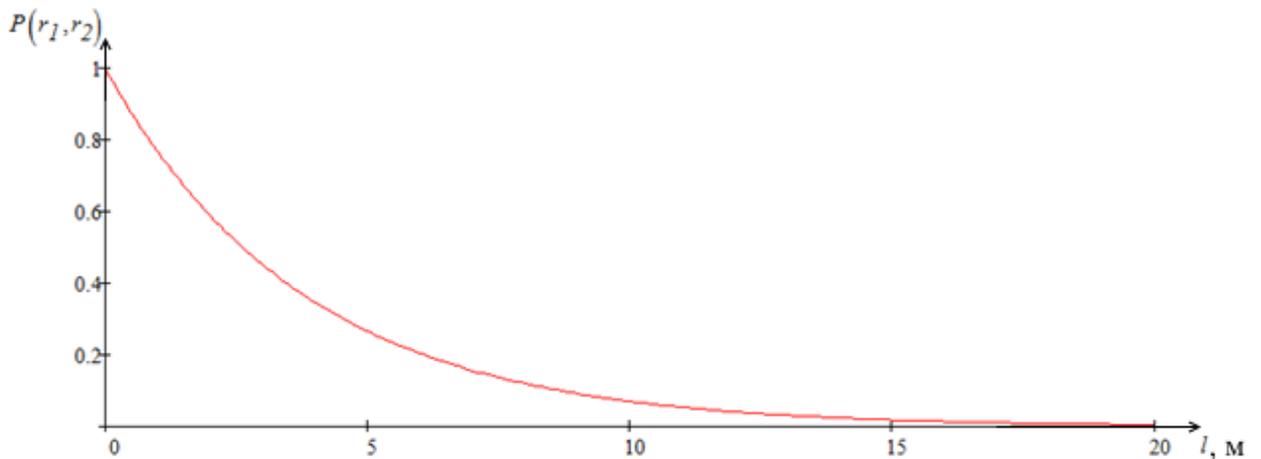


Рис. 4. Зависимость вероятности прямой видимости от расстояния между проекциями на плоскость земли точек расположения ВС и пункта приёма данных

Анализ представленных графиков показывает, что вероятность прямой видимости увеличивается с увеличением высоты полёта ВС. При этом эта тенденция замедляется с увеличением значения z_1 . Если при переходе от $z_1 = 500$ к $z_1 = 1000$ это значение

увеличивается в 670 раз, то при переходе от $z_1 = 1000$ к $z_1 = 2000$ это значение увеличивается в 2,05 раза.

Вероятность прямой видимости уменьшается с увеличением расстояния между проекциями точек на плоскость земли. При этом тенденция нарастает с увеличением значения $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$. Если при переходе от 0,5 к 1 это значение уменьшается в 1,141 раза, то при переходе от 8 к 16 это значение уменьшается в 8,846 раза.

Литература

1. Пономарёв Г.А., Куликов А.Н., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе.- Томск: МП "РАСКО", 1991.
2. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности.- М.: Наука, 1972.
3. Лакс П., Филипс Р. Теория рассеяния волн. – М.: Мир, 1978.
4. Козлов А.И., Сергеев В.Г. Распространение радиоволн по естественным трассам.- М.: МГТУ ГА, 1998.
5. Затучный Д.А. Метод передачи данных с борта воздушного судна в городских районах в режиме автоматического зависимого наблюдения с целью снижения эффекта отражения волн// Научный Вестник МГТУ ГА №176, 2012, стр. 145-148.

REFERENCE

1. Ponomarev G.A., Kulikov A.N., Telpuhovskiy E.D. Rasprostranenie UKV v gorode.- Tomsk: MP "RASKO", 1991.
2. Bass F.G., Fuks I.M. Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoy poverhnosti.- M.: Nauka, 1972.
3. Laks P., Filips R. Teoriya rasseyaniya voln. – M.: Mir, 1978.
4. Kozlov A.I., Sergeev V.G. Rasprostranenie radiovoln po estestvennyim trassam.- M.: MGTU GA, 1998.
5. Zatuchnyy D.A. Metod peredachi dannykh s borta vozdushnogo sudna v gorodskikh rayonah v rezhime avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya s tselyu snizheniya effekta otrazheniya voln// Nauchnyy Vestnik MGTU GA #176, 2012, ctr. 145-148.

RESEARCH OF INFLUENCE ON DISTRIBUTION OF RADIO WAVES IN CITY OF PROFILE OF HIS BUILDING

Zatuchny D.A., Slad J.V.

In this article influence is investigated on distribution of radio waves in the municipal terms of height and building closeness. A model over of distribution of radio waves is brought from an aircraft side. Charts over of dependence of probability of arrival of signal are brought from airship from the height of flight and middle number of building.

Keywords: probability of arrival of the reflected wave, mean value of the field in the point of reception, field intensity.

Сведения об авторах

Затучный Дмитрий Александрович, 1970 г.р., окончил Московский государственный педагогический университет имени В.И.Ленина (1992), кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭРЭО ВТ МГТУ ГА, автор 64 научных работ, область научных интересов – навигация, организация воздушного движения.

Сладь Жорж Васильевич, 1939 г.р., кандидат технических наук, Учёный секретарь филиала "НИИ Аэронавигации" ФГУП ГосНИИ ГА, автор 65 научных работ, область научных интересов – навигация, организация воздушного движения.