

Международный союз электросвязи

**МСЭ-R**

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R P.681-7**  
(10/2009)

**Данные о распространении радиоволн,  
необходимые для проектирования  
сухопутных подвижных систем связи  
Земля-космос**

**Серия Р**  
**Распространение радиоволн**



Международный  
союз  
электросвязи

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

### Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publications/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	<b>Распространение радиоволн</b>
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

*Примечание.* – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 МСЭ-R.

Электронная публикация  
Женева, 2010 г.

© ITU 2010

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.681-7\*

**Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования сухопутных подвижных систем связи Земля-космос**

(Вопрос МСЭ-R 207/3)

(1990-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2009)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации прогнозируются различные параметры распространения радиоволн, необходимые для планирования сухопутной подвижной спутниковой службы (СПСС) связи Земля-космос.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что для надлежащего планирования сухопутных подвижных систем необходимо иметь соответствующие данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования;
- b) что для планирования систем электросвязи Земля-космос рекомендуются методы, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.618;
- c) что требуется дальнейшее развитие методов прогнозирования для конкретного применения в сухопутных подвижных спутниковых системах с целью обеспечения достаточной точности во всех районах мира и для всех эксплуатационных условий;
- d) что, тем не менее, существуют методы, обеспечивающие достаточную точность для многих применений,

*рекомендует,*

1 чтобы для планирования сухопутных подвижных систем электросвязи Земля-космос в дополнение к методам, рекомендованным в Рекомендации МСЭ-R P.618, были приняты методы, представленные в Приложении 1.

**Приложение 1****1 Введение**

Явления распространения радиоволн для сухопутной подвижной спутниковой службы (СПСС) отличаются от аналогичных явлений для фиксированной спутниковой службы (ФСС) прежде всего по причине более значительного влияния местности. В ФСС обычно можно бороться с многолучевостью, затенением и перекрытием путем использования остронаправленных антенн, размещенных на открытых местах. Поэтому, как правило, процент времени готовности СПСС меньше, чем для ФСС. Для проектировщиков систем наибольший интерес представляет диапазон процента готовности от 80% до 99%.

---

\* Настоящую Рекомендацию необходимо довести до сведения 8-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

В настоящем Приложении представлены данные и модели, особенно необходимые для прогнозирования ухудшения связи на линиях СПСС, возникающего вследствие влияния тропосферы и ионосферы, многолучевости, перекрытия и затенения. В Приложении используются данные измерений в диапазоне частоты от 870 МГц в УВЧ диапазоне до 20 ГГц.

## **2 Тропосферные явления**

### **2.1 Ослабление**

Потери при распространении сигнала в тропосфере обусловлены атмосферными газами, дождем, туманом и облаками. Во всех случаях, за исключением трасс с низкими углами места, потери при распространении в тропосфере пренебрежимо малы на частотах ниже 1 ГГц и, как правило, остаются незначительными вплоть до частоты примерно 10 ГГц. Выше 10 ГГц для многих типов трасс уровень ослабления может быть высоким для существенных процентов времени. Существуют методы прогнозирования поглощения в газах (Рекомендация МСЭ-R P.676) и ослабления в дожде (Рекомендация МСЭ-R P.618). Ослабление за счет тумана и облаков обычно пренебрежимо мало на частотах вплоть до 10 ГГц.

### **2.2 Мерцания**

Нерегулярные изменения уровня принимаемого сигнала и угла его прихода происходят как из-за тропосферной турбулентности, так и вследствие атмосферной многолучевости. Масштабы этого явления увеличиваются при увеличении частоты и уменьшении угла места трассы, за исключением флуктуаций угла прихода, вызванных турбулентностью и не зависящих от частоты. Угол раствора антенны также влияет на величину таких мерцаний. Наблюдения показали, что эти явления максимально проявляются летом. Соответствующий метод прогнозирования представлен в Рекомендации МСЭ-R P.618.

## **3 Ионосферные явления**

Влиянию ионосферы на трассы Земля-космос посвящена Рекомендация МСЭ-R P.531. Величины ионосферных воздействий для частот в диапазоне от 0,1 до 10 ГГц приведены в таблицах 1 и 2 Рекомендации МСЭ-R P.680.

## **4 Затенение**

### **4.1 Модель затенения придорожными деревьями**

Для разработки расширенной эмпирической модели затенения придорожной растительностью использовались данные измерений кумулятивного распределения замираний на частотах 870 МГц, 1,6 ГГц и 20 ГГц. Плотность деревьев вдоль дороги представлена процентом оптического затенения, вызванного этими деревьями, при угле места трассы  $45^\circ$  в направлении излучения сигнала. Данная модель справедлива, когда этот процент находится в пределах 55–75%.

#### **4.1.1 Расчет замираний, вызванных затенением придорожной растительностью**

Следующая процедура позволяет получить оценки глубины замирания, вызванного затенением придорожной растительностью, на частотах между 800 МГц и 20 ГГц, для трасс с углами места от  $7^\circ$  до  $60^\circ$  и длине пройденного расстояния от 1% до 80%. Эмпирическая модель соответствует усредненным условиям распространения, когда транспортное средство движется по боковой части автомагистрали (случаи, когда дорога с односторонним движением проходит вблизи или вдалеке от придорожных деревьев, также включены). Модель применима к автомагистралям и сельским дорогам, когда общее направление трассы распространения для большей ее части перпендикулярно линии, вдоль которой растут деревья и расположены придорожные столбы. Предполагается, что основная причина ослабления сигнала СПСС – это затенение лиственным покровом (см. Рекомендацию МСЭ-R P.833).

Необходимы следующие параметры:

$f$ : частота (ГГц);

$\theta$ : угол места трассы по отношению к спутнику (град.);

$p$ : процент пройденного расстояния, на котором превышаете названный уровень замирания.

*Шаг 1:* Рассчитать распределение замираний на частоте 1,5 ГГц, которое справедливо для процента пройденного расстояния в диапазоне  $20\% \geq p \geq 1\%$ , при требуемом угле места трассы  $60^\circ \geq \theta \geq 20^\circ$ :

$$A_L(p, \theta) = -M(\theta) \ln(p) + N(\theta), \quad (1)$$

где

$$M(\theta) = 3,44 + 0,0975 \theta - 0,002 \theta^2, \quad (2)$$

$$N(\theta) = -0,443 \theta + 34,76. \quad (3)$$

*Шаг 2:* Преобразовать распределение замираний, полученное для частоты 1,5 ГГц и справедливое при  $20\% \geq p \geq 1\%$ , в соответствующее распределение на желаемой частоте  $f$  (ГГц) в диапазоне  $0,8 \text{ ГГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$ :

$$A_{20}(p, \theta, f) = A_L(p, \theta) \exp \left\{ 1,5 \left[ \frac{1}{\sqrt{f_{1,5}}} - \frac{1}{\sqrt{f}} \right] \right\}. \quad (4)$$

*Шаг 3:* Рассчитать распределение замираний для процентов расстояний  $80\% \geq p > 20\%$  в диапазоне частот  $0,85 \text{ ГГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$ :

$$\begin{aligned} A(p, \theta, f) &= A_{20}(20\%, \theta, f) \frac{1}{\ln 4} \ln \left( \frac{80}{p} \right) && \text{для } 80\% \geq p > 20\%, \\ &= A_{20}(p, \theta, f) && \text{для } 20\% \geq p > 1\%. \end{aligned} \quad (5)$$

*Шаг 4:* Для углов места трассы в диапазоне  $20^\circ > \theta \geq 7^\circ$  распределение замираний принимается таким же, как при  $\theta = 20^\circ$ .

На рисунке 1 показаны величины превышенных замираний на частоте 1,5 ГГц в зависимости от угла места от  $10^\circ$  до  $60^\circ$  для ряда одинаковых значений процента от 1% до 50%.

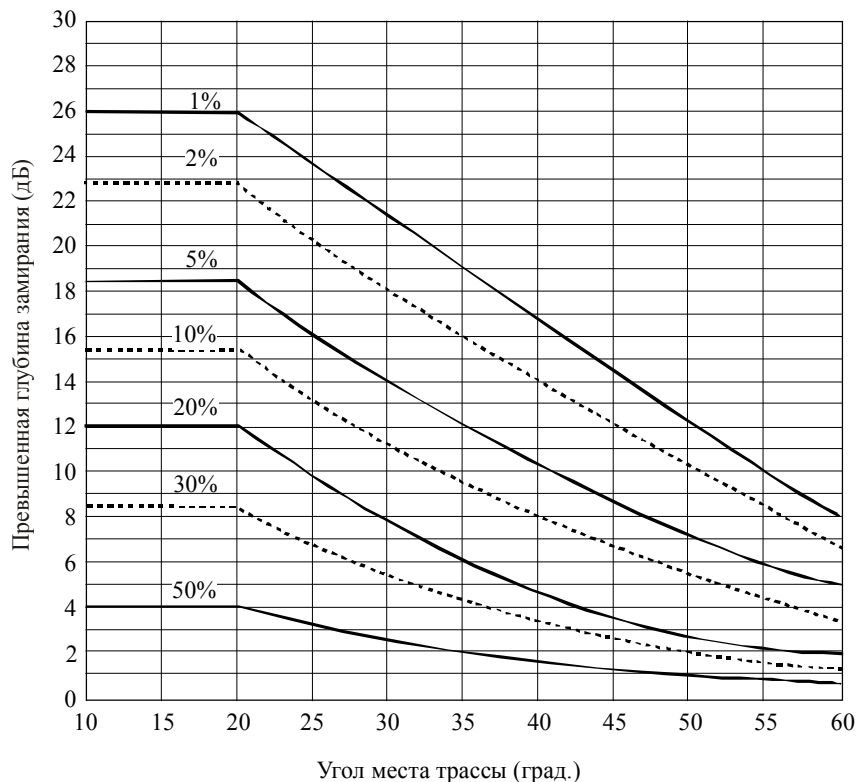
#### 4.1.1.1 Применение метода для углов возвышения $> 60^\circ$

Модель затенения придорожной растительностью на частотах 1,6 ГГц и 2,6 ГГц можно использовать при углах места трассы выше  $60^\circ$ , применив следующую процедуру:

- использовать уравнения (1)–(5) при угле места более  $60^\circ$  на указанных выше частотах;
- провести линейную интерполяцию между значением, рассчитанным для угла  $60^\circ$ , и значениями замираний для угла места  $80^\circ$ , приведенными в таблице 1;
- провести линейную интерполяцию между значениями из таблицы 1 и нулем при  $90^\circ$ .

РИСУНОК 1

Замирания на частоте 1,5 ГГц, вызванные затенением придорожной растительностью в зависимости от угла места трассы



0681-01

ТАБЛИЦА 1

Превышенные значения замираний (дБ) при угле места 80°

p (%)	Затенение деревьями	
	1,6 ГГц	2,6 ГГц
1	4,1	9,0
5	2,0	5,2
10	1,5	3,8
15	1,4	3,2
20	1,3	2,8
30	1,2	2,5

#### 4.1.1.2 Применение модели затенения придорожной растительностью для негеостационарных (НГСО) и подвижных спутниковых систем

Описанная выше модель прогнозирования была разработана и применима для такой геометрии СПСС, когда угол места остается постоянным. В случае негеостационарных систем, когда угол места меняется, готовность линии можно рассчитать следующим образом:

- рассчитать процент времени для каждого угла места (или диапазона углов места), под которым виден спутник со стороны терминала;
- для заданного запаса на распространение (ордината на рисунке 1) определить процент неготовности для каждого угла места;

- с) для каждого угла места перемножить результаты, полученные на шагах а) и б), а произведение разделить на 100, что даст процент неготовности системы при данном угле места;
- д) сложить все значения, полученные на шаге с), что даст значение общей неготовности системы.

Если антенна подвижного терминала имеет неизотропную диаграмму направленности, то на шаге б) для каждого угла места из величины запаса на замирание следует вычесть усиление антенны.

В случае спутникового созвездия с многоканальной видимостью, использующего разнесение трасс (т. е. переключение на трассу с наименьшим ослаблением сигнала), приближенный расчет можно провести, предположив, что используется космический аппарат с самым большим углом места.

#### 4.1.2 Модель распределения длительности замираний

Правильность проектирования приемников сухопутных подвижных спутниковых служб зависит от знания соответствующих статистических данных о продолжительности замираний, которую можно выразить в единицах длины, т. е. метрах или в секундах. На основе измерения длительности замираний была получена следующая эмпирическая модель, которая справедлива для замираний, прошедших расстояние  $dd \geq 0,02$  м.

$$P(FD > dd | A > A_q) = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\ln(dd) - \ln(\alpha)}{\sqrt{2} \sigma} \right] \right), \quad (6)$$

где  $P(FD > dd | A > A_q)$  представляет собой вероятность того, что протяженность участка, на котором возникло замирание,  $FD$ , превышает расстояние  $dd$  (м) при условии, что ослабление  $A$  превышает значение  $A_q$ . "erf" обозначает интеграл вероятности ошибок,  $\sigma$  – стандартное отклонение величины  $\ln(dd)$ , а  $\ln(\alpha)$  – среднее значение величины  $\ln(dd)$ . Левая часть уравнения (6) оценивалась путем расчета процентной доли числа событий, определяемых как "длительность замираний" превысивших  $dd$ , от общего числа событий, для которых  $A > A_q$ , по данным, собранным в Соединенных Штатах Америки и в Австралии. На основе этих данных методом регрессионного анализа были получены следующие оптимальные значения:  $\alpha = 0,22$  и  $\sigma = 1,215$ .

На рисунке 2 представлена зависимость  $P$ , выраженного в процентах,  $p$ , от величины  $dd$  при пороговом значении 5 дБ.

Модель, представленная уравнением (6), основана на измерениях, проведенных на трассах с углом места  $51^\circ$ , и применима в условиях умеренного и сильного затенения (процент оптического затенения  $55\%$ – $90\%$ ). Испытания при углах места  $30^\circ$  и  $60^\circ$  показали, что зависимость от угла места довольно проста: чем меньше угол места, тем больше продолжительность замирания для заданного процента. Например, для  $30^\circ$  длительность замирания оказалась примерно вдвое больше, чем для  $60^\circ$ , при том же процентном уровне.

#### 4.1.3 Модель распределения длительности не-замираний

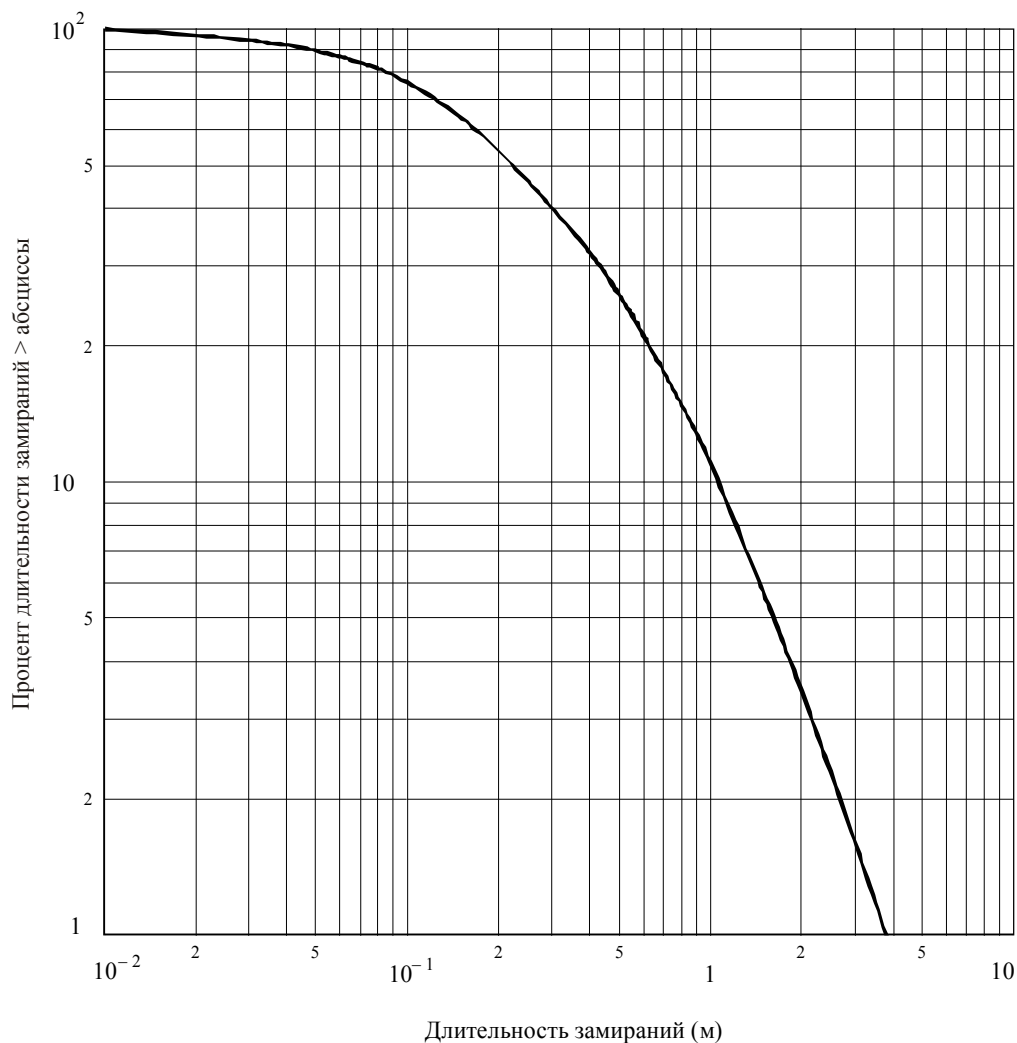
Событие, которое называется "длительность не-замираний" на участке длиной  $dd$ , определяется как расстояние, на котором уровень замираний остается ниже заданного порогового значения. Модель длительности не-замираний представлена следующим уравнением:

$$p(NFD > dd | A < A_q) = \beta (dd)^{-\gamma}, \quad (7)$$

где  $p(NFD > dd | A < A_q)$  – процент вероятности того, что непрерывный участок, на котором возникает не-замирание,  $NFD$ , превышает расстояние  $dd$ , при условии, что уровень замирания остается ниже порогового значения  $A_q$ . В таблице 2 представлены значения  $\beta$  и  $\gamma$  для дорог, на которых возникает "умеренное и сильное" затенение, т. е. процент оптического затенения меняется в диапазоне  $55\%$ – $75\%$  и  $75\%$ – $90\%$ , соответственно. Величина порогового значения замирания,  $A_q$ , равна 5 дБ.

РИСУНОК 2

Наилучшая аппроксимация кумулятивного распределения длительности замираний, обусловленных затенением придорожными деревьями, при пороговом значении 5 дБ



0681-02

ТАБЛИЦА 2

Значения коэффициентов регрессии в уравнении для длительности не-замираний при величине порога 5 дБ и угле места 51°

Уровень затенения	$\beta$	$\gamma$
Умеренный	20,54	0,58
Сильный	11,71	0,8371

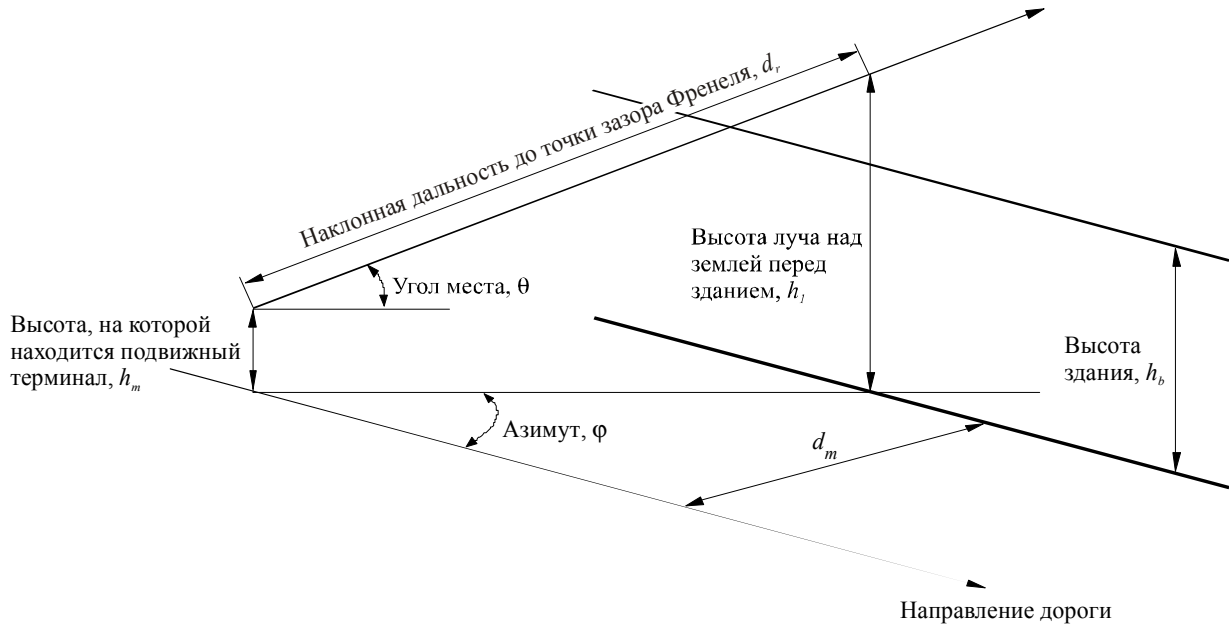
#### 4.2 Модель затенения придорожными зданиями

Затенение придорожными зданиями в городской зоне может моделироваться путем применения релейского распределения в отношении высоты зданий. На рисунке 3 показана геометрия модели.



РИСУНОК 3

## Геометрия модели затенения придорожными зданиями



0681-03

Процент вероятности перекрытия зданиями определяется следующим образом:

$$p = 100 \exp \left[ - (h_1 - h_2)^2 / 2h_b^2 \right] \quad \text{для } h_1 > h_2, \quad (8)$$

где

$h_1$ : высота луча над землей у фасада здания, определяемая следующим образом:

$$h_1 = h_m + (d_m \tan \theta / \sin \varphi); \quad (8a)$$

$h_2$ : расстояние зазора Френеля, требуемого над зданиями, определяемое следующим образом:

$$h_2 = C_f (\lambda d_r)^{0,5}; \quad (8b)$$

$h_b$ : наиболее распространенная (наиболее вероятная) высота здания;

$h_m$ : высота подвижного устройства над землей;

$\theta$ : угол места луча к спутнику относительно горизонтальной плоскости;

$\varphi$ : азимутальный угол луча относительно направления улицы;

$d_m$ : дальность подвижного устройства от фасада здания;

$d_r$ : наклонная дальность от подвижного устройства до позиции на луче, находящейся вертикально над фасадом здания, определяемая следующим образом:

$$d_r = d_m / (\sin \varphi \cdot \cos \theta); \quad (8c)$$

$C_f$ : требуемый зазор как часть первой зоны Френеля;

$\lambda$ : длина волны

и где  $h_1, h_2, h_b, h_m, d_m, d_r$  и  $\lambda$  – постоянные единицы и  $h_1 > h_2$ .

Следует заметить, что уравнения (8a), (8b) и (8c) справедливы для  $0 < \theta < 90^\circ$  и для  $0 < \varphi < 180^\circ$ . Фактические ограничивающие значения применяться не должны.

На рисунке 4 представлены примеры затенения придорожными зданиями, рассчитанные с помощью приведенных выше уравнений для:

$$h_b = 15 \text{ м}$$

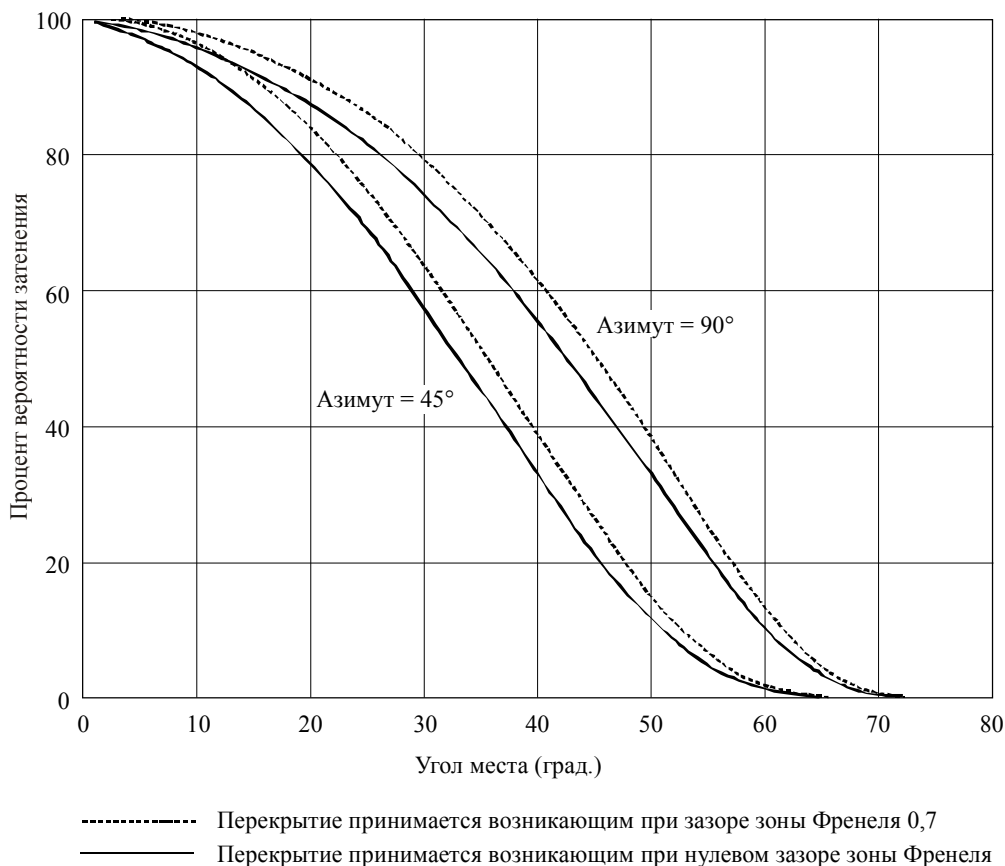
$$h_m = 1,5 \text{ м}$$

$$d_m = 17,5 \text{ м}$$

$$\text{частота} = 1,6 \text{ ГГц.}$$

РИСУНОК 4

**Примеры затенения придорожными зданиями**  
(значения параметров см. в тексте)



0681-04

На рисунке 4 пунктирные линии означают, что перекрытие считается существующим, если зазор луча составляет менее 0,7 первой зоны Френеля, расположенной вертикально над фасадом здания. Сплошные линии означают, что перекрытие считается существующим, только в случае отсутствия прямой видимости.

Несмотря на то что модель показывает отсутствие перекрытия при высших углах места трассы, пользователям следует знать, что возможны эпизодические затенение и перекрытие, вызываемые эстакадами, выступающими флагами, отводами и т. д.

#### 4.3 Аспекты, связанные с портативными терминалами (перекрытие, вызываемое пользователем)

При использовании портативных терминалов связи голова или тело оператора, находясь в поле антенны, вызывает изменение диаграммы направленности антенны. Для случая систем со спутниками, не находящимися на околоземной орбите (не-ОЗО) (ГСО, высокая околоземная орбита (ВОО), ICO), предполагается, что позиция пользователя портативного терминала должна быть такова, чтобы ни его голова (или тело), ни окружающая среда не вызывали перекрытия. Для систем,

использующих ОЗО, такое допущение сделать нельзя. Влияние головы (или тела) пользователя можно оценить, используя при расчете процента готовности линии методом, описанным в п. 4.1.1.2, модифицированную диаграмму направленности антенны (которую необходимо измерить). Допуская, что азимутальные углы, под которыми виден спутник, распределены равномерно, можно использовать усредненную по азимуту угломестную диаграмму направленности. Незначительные движения головой или рукой, ведущие к изменению кажущегося угла места, также можно усреднить.

В Японии был проведен полевой эксперимент для исследования этого явления. На рисунке 5а показана геометрия расположения головы человека и антенны в этом эксперименте. Угол места спутника составляет  $32^\circ$ , а частота сигнала, передаваемого спутником, – 1,5 ГГц. Усиление антенны 1 дБи при длине 10 см. На рисунке 5б показано изменение относительного уровня сигнала в зависимости от величины азимутального угла  $\phi$  на рисунке 5а. Из рисунка 5б видно, что максимальное уменьшение уровня сигнала из-за перекрытия, вызываемого пользователем, составляет примерно 6 дБ, когда устройство находится в области, затененной головой человека.

Результаты, представленные на рисунке 5б, следует считать лишь иллюстрацией, поскольку данные соответствуют только одному значению угла места и диаграммы направленности антенны и совершенно не учитываются потенциально возможные эффекты зеркального отражения, которые могут играть весьма существенную роль в отношении окружающей среды портативного терминала при низкой направленности антенны.

Данные распространения, относящиеся к потерям сигнала на входе при приеме внутри здания и транспортного средства, в частности для случая портативных терминалов, содержатся в Рекомендации МСЭ-R P.679.

#### 4.4 Моделирование влияния перекрытия зданиями с использованием функций экранирования улицы (МКФ)

Влияние перекрытия зданиями может быть оценено количественно с помощью функций МКФ улицы, указывающей азимут и угол места, при которых линия связи может или не может быть полностью установлена. Функции такого типа получают, как правило, путем фотограмметрических исследований или отслеживания траектории луча. Концепция МКФ может применяться для упрощенных сценариев в целях создания ограниченного числа функций МКФ и, следовательно, для обеспечения возможности проведения быстрой примерной оценки общей готовности при разных конфигурациях с несколькими спутниками.

Данная городская зона может быть описана, в первом приближении, с помощью среднего угла экранирования (МКА) (град.).

МКА определяется как угол места спутника для скользящего угла относительно верхних поверхностей зданий, когда линия связи перпендикулярна улице, что на языке математики означает:

$$\text{МКА} = \arctan\left(\frac{h}{w/2}\right) \quad \text{град.}, \quad (9)$$

где

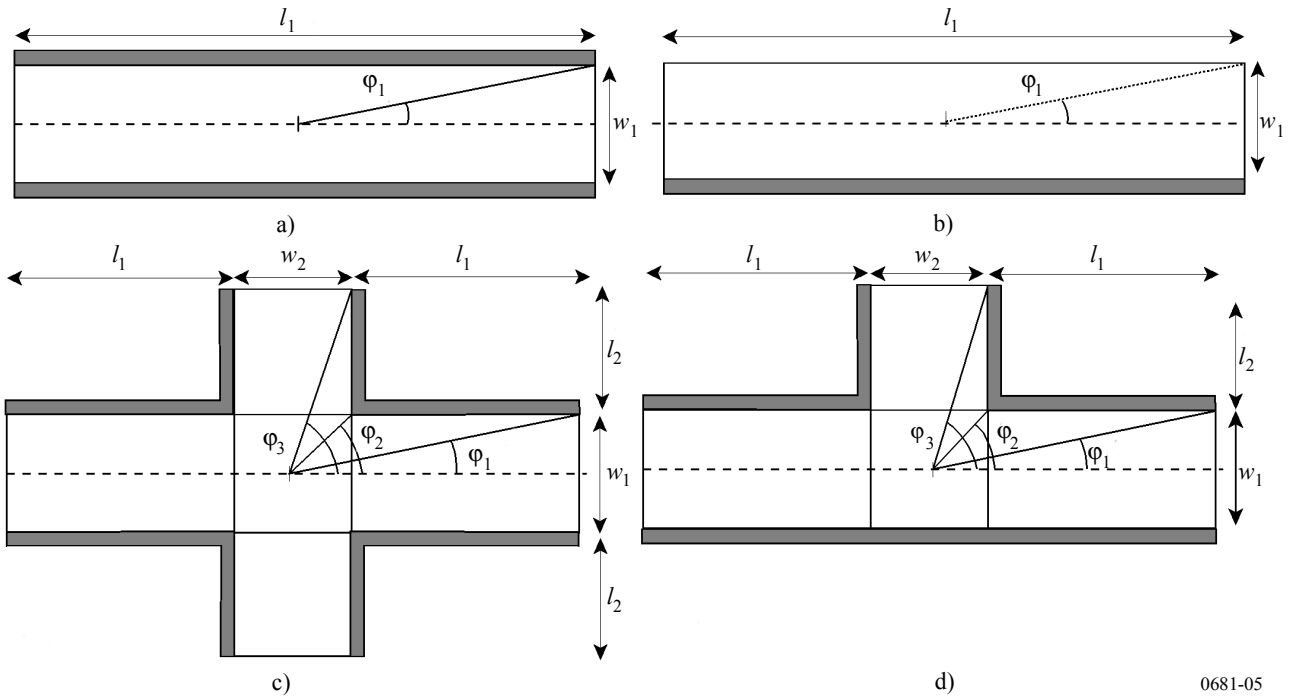
$h$ : средняя высота зданий;

$w$ : средняя ширина улицы.

Кроме того, может быть принят городской сценарий с заданным МКА для создания набора небольшого числа типовых конфигураций (базовые/образующие сценарии), а именно: уличные каньоны (scy), уличные перекрестки (scr), Т-образные перекрестки (T-j) и отдельно стоящие стены (sw), каждая из них характеризуется данной вероятностью появления (см. рисунок 5). Аналогично может быть определен вектор структуры трассы,  $\vec{M}$ , указывающий для данной застроенной зоны вероятность появления каждого из образующих сценариев  $\vec{M}(w_{scy}, w_{scr}, w_{T-j}, w_{sw})$ , при  $\sum w_i = 1$ . Входные параметры для этой модели, т. е. МКА, могут быть получены путем обследования условий или по городским картам.

РИСУНОК 5

Базовые/образующие сценарии, описывающие данную городскую зону



0681-05

Если получена вероятность готовности для этих четырех образующих сценариев, общая готовность может быть приблизительно оценена как взвешенная сумма значений готовности каждого сценария:

$$a_T = w_{scy} a_{scy} + w_{scr} a_{scr} + w_{T-j} a_{T-j} + w_{sw} a_{sw}. \quad (10)$$

Функции МКФ для этих четырех базовых сценариев были построены простым геометрическим способом при том допущении, что пользователь находится в центре плана (см. рисунок 5). На рисунке 6 представлены функции МКФ четырех образующих сценариев для простой модели распространения с прерываниями, т. е. при наличии прямой видимости – в отсутствие прямой видимости (аналогично п. 4.2 для случая нулевого зазора зоны Френеля), где по ординате указаны угол места, по абсциссе – азимут или, вернее, ориентирование улицы,  $\xi$ , по отношению к линии связи. На верхней части диаграммы указаны положительные значения азимута, на нижней части – соответствующие отрицательные значения азимута. МКФ определяет районы на небесной полусфере, в которых может быть (незатененные области) или не может быть (затененные области) установлена линия связи. Границы "запрещенных" зон в МКФ отмечены сегментами и точками. Наиболее типичные показаны на рисунке 6 и определяются следующими уравнениями:

$$S_A: \theta = \tan^{-1} \left( h / \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\tan^2 \varphi} + 1\right)} \right), \quad (11a)$$

$$P_A: \left( \varphi_A = 90^\circ; \theta_A = \tan^{-1} \left( \frac{h}{w/2} \right) \right), \quad (11b)$$

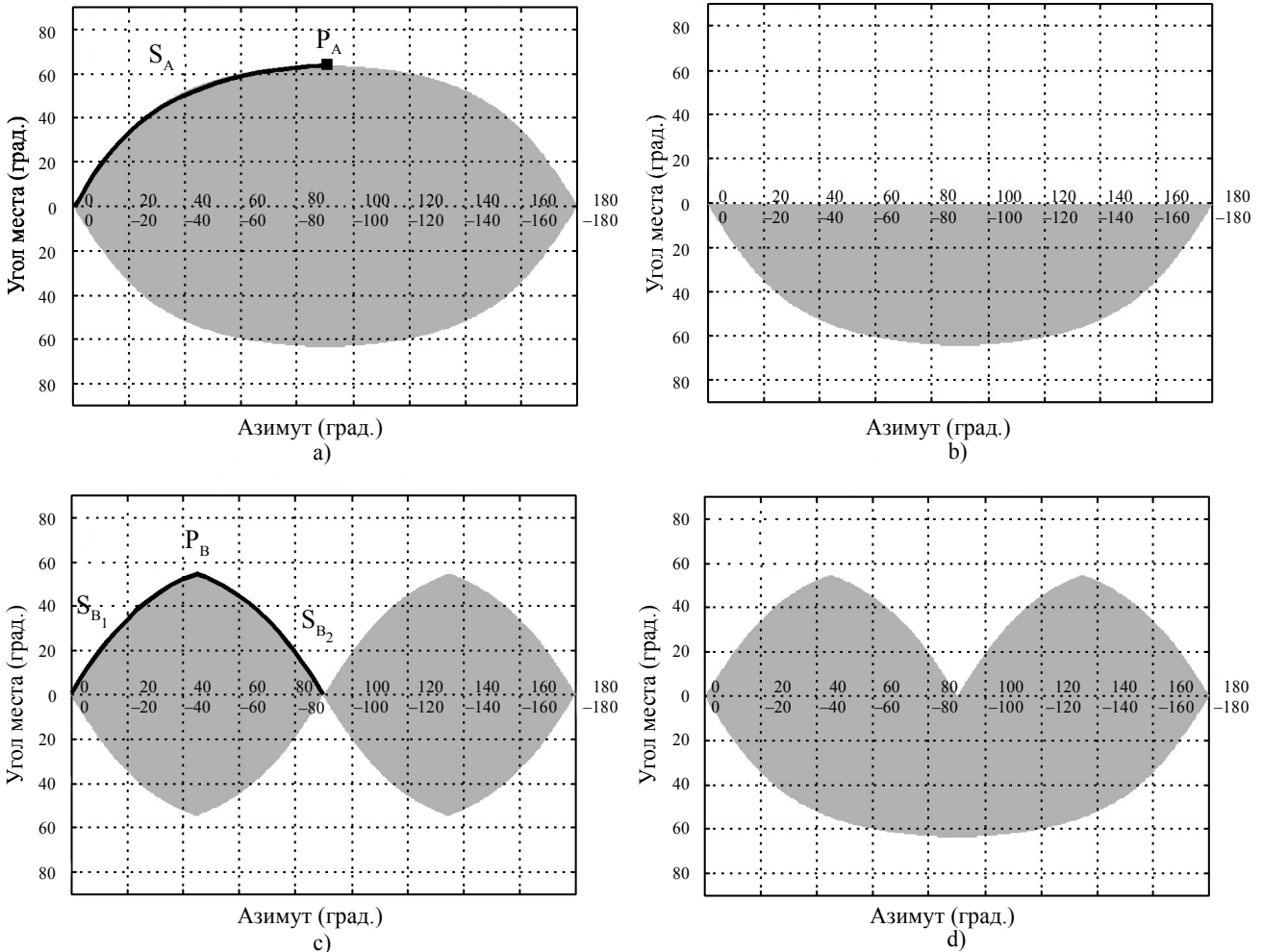
$$S_{B_1}: \theta = \tan^{-1} \left( h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\tan^2 \varphi} + 1\right)} \right), \quad (11c)$$

$$S_{B_2}: \theta = \tan^{-1} \left( h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\tan^2(90^\circ - \varphi)} + 1\right)} \right), \quad (11d)$$

$$P_B: \left( \varphi_B = \tan^{-1} \left( \frac{w_1}{w_2} \right); \theta_2 = \tan^{-1} \left( h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\tan^2 \varphi_B} + 1\right)} \right) \right). \quad (11e)$$

РИСУНОК 6

Функция МКФ а) уличного каньона, б) отдельно стоящей стены  
 с) уличного перекрестка и д) Т-образного перекрестка

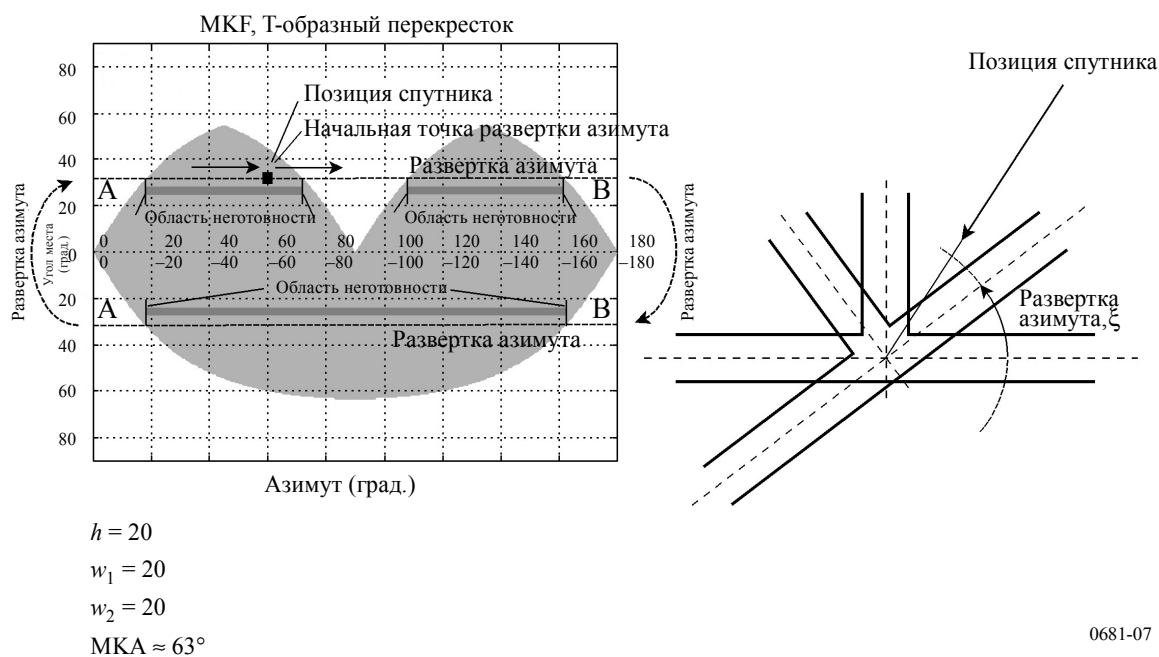


$h = 20$   
 $w_1 = 20$   
 $w_2 = 20$   
 $\text{МКА} \approx 63^\circ$

Готовность для конкретного базового сценария и данного геостационарного (ГСО) спутника может быть рассчитана путем рассмотрения всех возможных вариантов ориентирования улицы  $\xi$  относительно линии связи пользователь-спутник. На рисунке 7 показано положение ГСО спутника относительно Т-образного перекрестка. Для случая, показанного на данном рисунке, все возможные варианты ориентирования могут быть описаны путем прохода по всем точкам на линии А-В, соответствующим постоянному углу места и всем возможным вариантам ориентирования улицы. Готовность – это часть прямой линии А-В в незатененной части МКФ. Аналогично на МКФ может быть отображена траектория орбиты негеостационарного (НГО) спутника. Общая готовность может быть рассчитана в этом случае путем рассмотрения всех возможных вариантов ориентирования улицы относительно всех возможных направлений линии связи пользователь-спутник.

РИСУНОК 7

Расчет готовности для случая Т-образного перекрестка и спутника ГСО



## 5 Модели многолучевости для линий прямой видимости без затенения

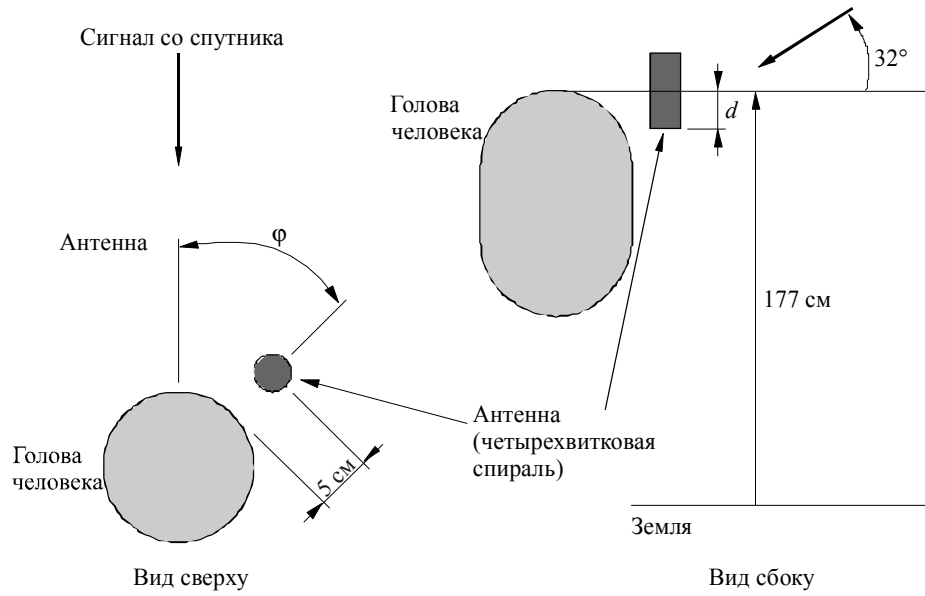
Во многих случаях подвижный терминал связан с подвижным спутником линией прямой видимости (с пренебрежимо малыми затенениями). Однако и в этих условиях из-за многолучевости, возникающей вследствие отражения сигнала от поверхности Земли, может возникать искажение сигнала. Сигнал, принимаемый подвижным терминалом, представляет собой сумму фазовых прямого сигнала, передаваемого по линии прямой видимости, и нескольких многолучевых сигналов. Эта многолучевость может оказывать конструктивное или деструктивное влияние, приводя к усилению или ослаблению сигнала. Характеристики многолучевого сигнала зависят от поперечного сечения рассеяния многолучевого отражателя, числа лучей, расстояний до приемной антенны, вида их поляризации и коэффициента направленного действия приемной антенны.

Модели, описывающие искажение сигнала вследствие многолучевости, представлены в следующих параграфах и основаны на результатах измерений с помощью антенны, имеющей следующие характеристики:

- ненаправленная по азимуту;
- усиление меняется менее чем на 3 дБ при изменении углов места от  $15^\circ$  до  $75^\circ$ ;
- ниже горизонта (отрицательный угол места) усиление антенны уменьшалось, по крайней мере, на 10 дБ.

РИСУНОК 8a

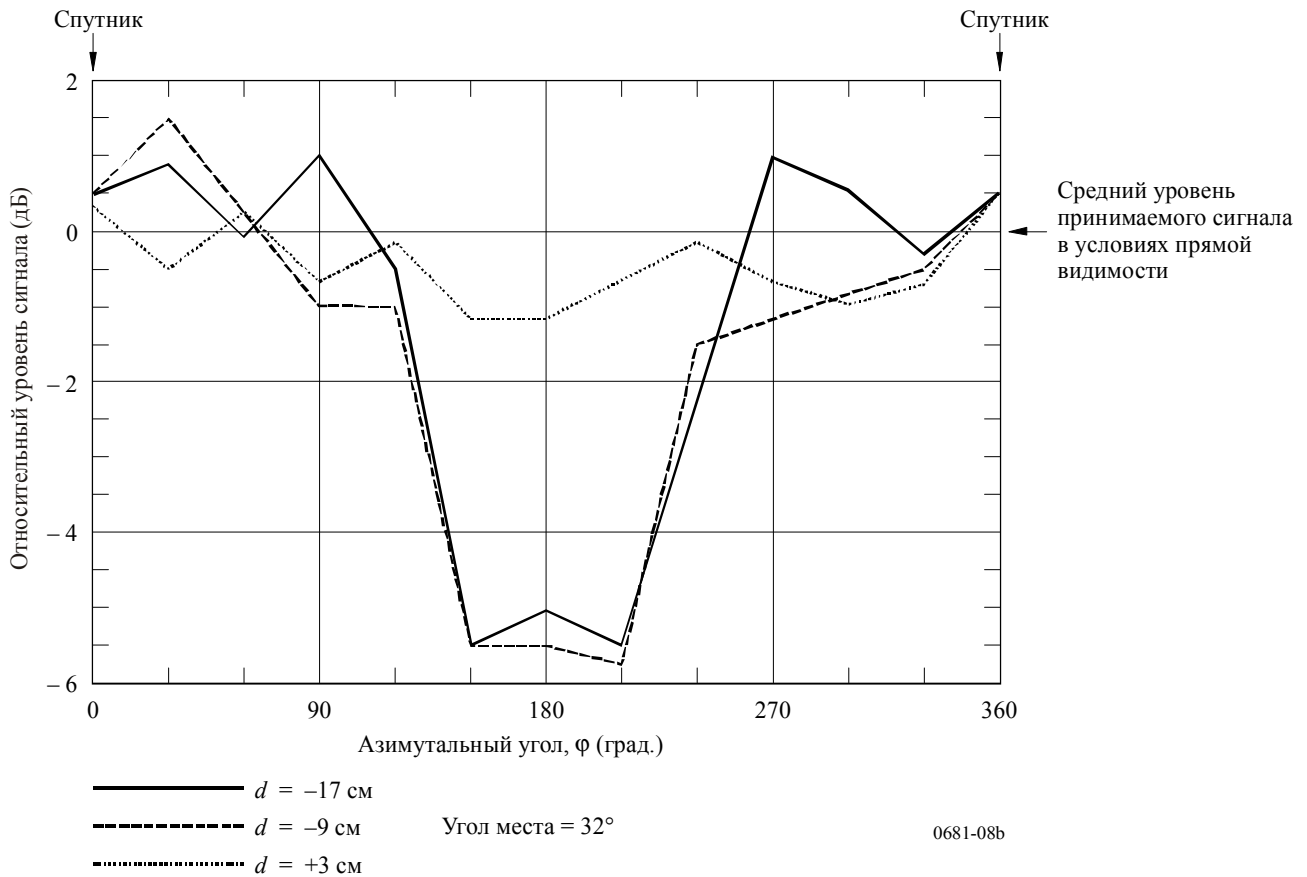
## Геометрия расположения головы человека и антенны



0681-08a

РИСУНОК 8b

## Относительный уровень сигнала в соответствии с конфигурацией, показанной на рис. 8a



0681-08b

### 5.1 Многолучевость в горных условиях

Распределение глубины замираний, вызванных многолучевостью, в горных условиях описывается следующим выражением:

$$p = a A^{-b} \quad (12)$$

для

$$1\% < p < 10\%,$$

где

$p$ : отрезок трассы, выраженный в процентах, на котором превышает данную глубину замирания;

$A$ : превышенная глубина замирания (дБ).

Параметры  $a$  и  $b$  для аппроксимации соответствующих кривых представлены в таблице 3 для частот 1,5 ГГц и 870 МГц. Заметим, что эта модель справедлива лишь в тех случаях, когда затенением можно пренебречь.

ТАБЛИЦА 3

**Параметры наилучшей аппроксимации кривых кумулятивного распределения замираний, вызванных многолучевостью, в горных условиях**

Частота (ГГц)	Угол места = 30°			Угол места = 45°		
	$a$	$b$	Диапазон (дБ)	$a$	$b$	Диапазон (дБ)
0,87	34,52	1,855	2–7	31,64	2,464	2–4
1,5	33,19	1,710	2–8	39,95	2,321	2–5

На рисунке 9 представлены кривые кумулятивных распределений замираний для углов места трасс 30° и 45° на частотах 1,5 ГГц и 870 МГц.

### 5.2 Многолучевость в условиях воздействия придорожных деревьев

Эксперименты, проведенные в Соединенных Штатах Америки вдоль дорог с растущими по обочинам деревьями показали, что многолучевое замирание мало зависит от угла места трассы в диапазоне 30°–60°. На основе результатов измерений была разработана следующая модель:

$$p = u \exp(-vA) \quad (13)$$

для

$$1\% < p < 50\%,$$

где

$p$ : отрезок трассы, выраженный в процентах, на котором превышает данную глубину замирания;

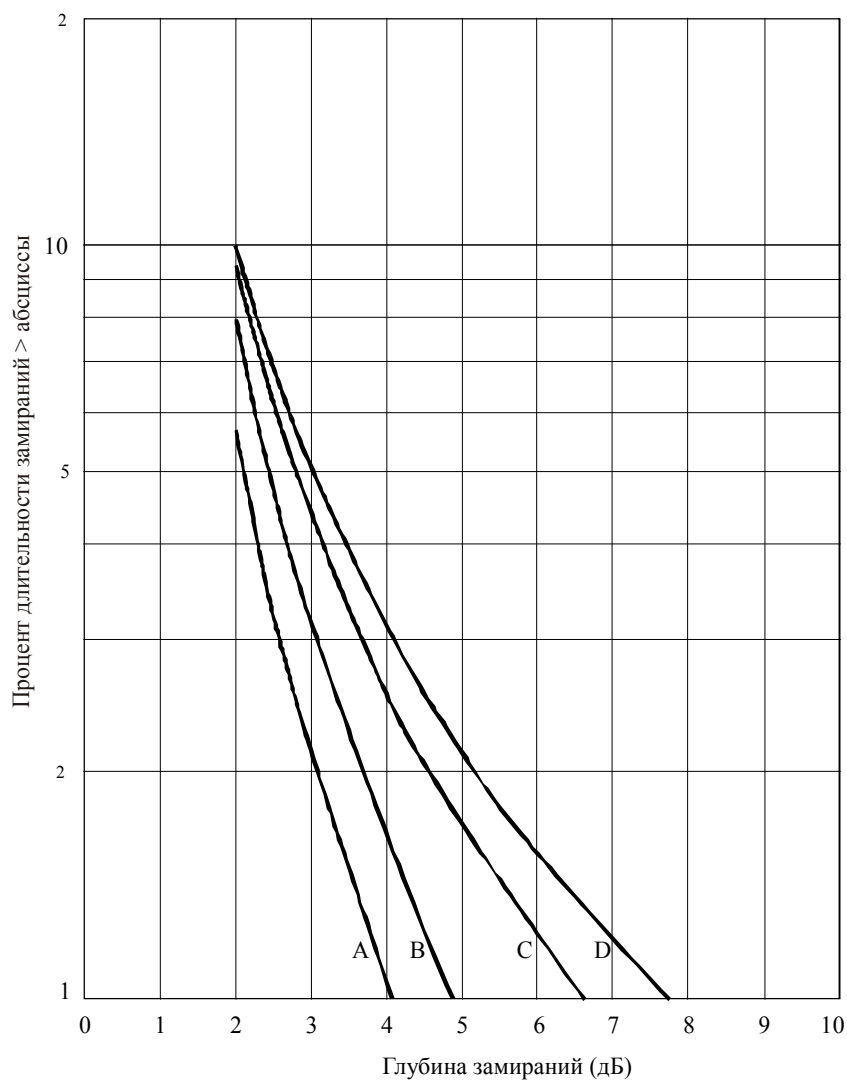
$A$ : превышенная глубина замирания (дБ).

Заметим, что в представленной выше модели предполагается, что затенение пренебрежимо мало. Параметры  $u$  и  $v$  для аппроксимации соответствующих кривых, представлены в таблице 4.



РИСУНОК 9

Наилучшая аппроксимация кумулятивных распределений глубины замираний, вызванных многолучевостью, в горных условиях



Кривые A: 870 МГц, 45°

B: 1,5 ГГц, 45°

C: 870 МГц, 30°

D: 1,5 ГГц, 30°

0681-09

ТАБЛИЦА 4

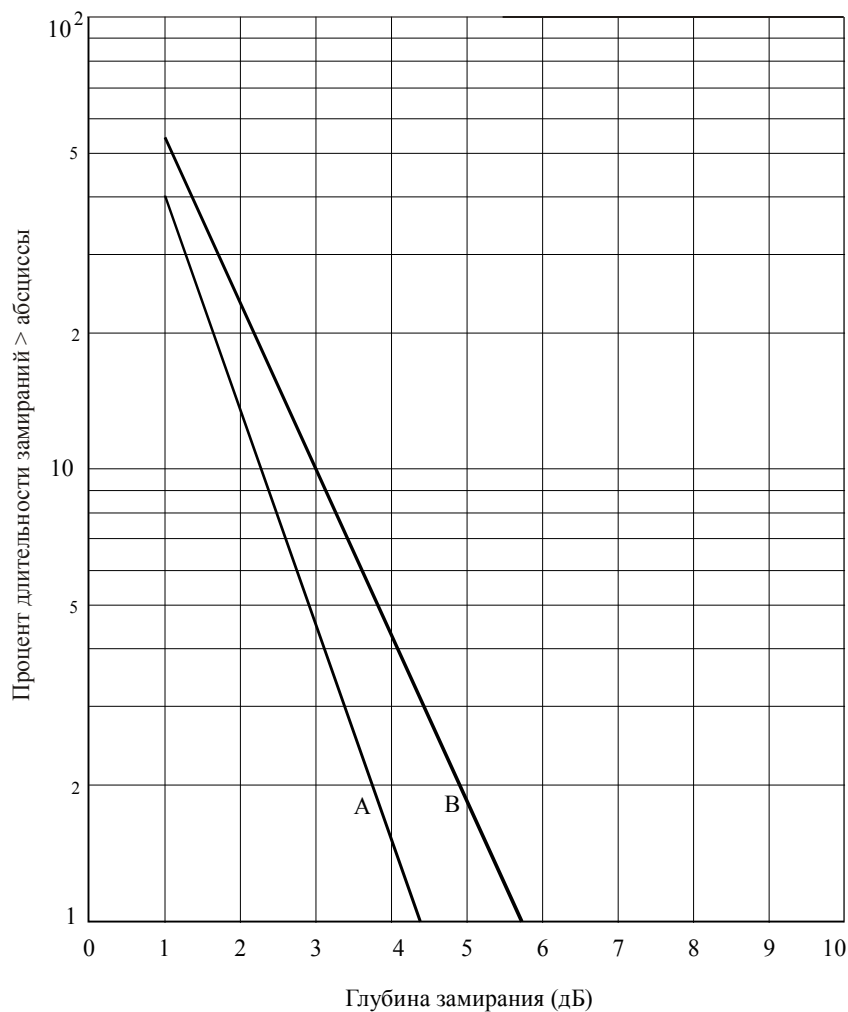
Параметры наилучшей экспоненциальной аппроксимации кривых кумулятивного распределения замираний, вызванных многолучевостью, на дорогах с растущими по обочинам деревьями

Частота (ГГц)	$u$	$v$	Диапазон замираний (дБ)
0,870	125,6	1,116	1–4,5
1,5	127,7	0,8573	1–6

На рисунке 10 представлены кривые кумулятивных распределений замираний на частотах 1,5 ГГц и 870 МГц. Замирание, усиленное из-за многолучевости, может возникнуть при более низких углах места ( $5^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ), когда лучи, рассеянные сравнительно гладкой холмистой земной поверхностью в прямом направлении, могут приниматься с больших расстояний.

РИСУНОК 10

Наилучшая аппроксимация кривых кумулятивного распределения замираний, вызванных многолучевостью, на дорогах с растущими по обочинам деревьями



Кривые A: 870 МГц  
B: 1,5 ГГц

0681-10

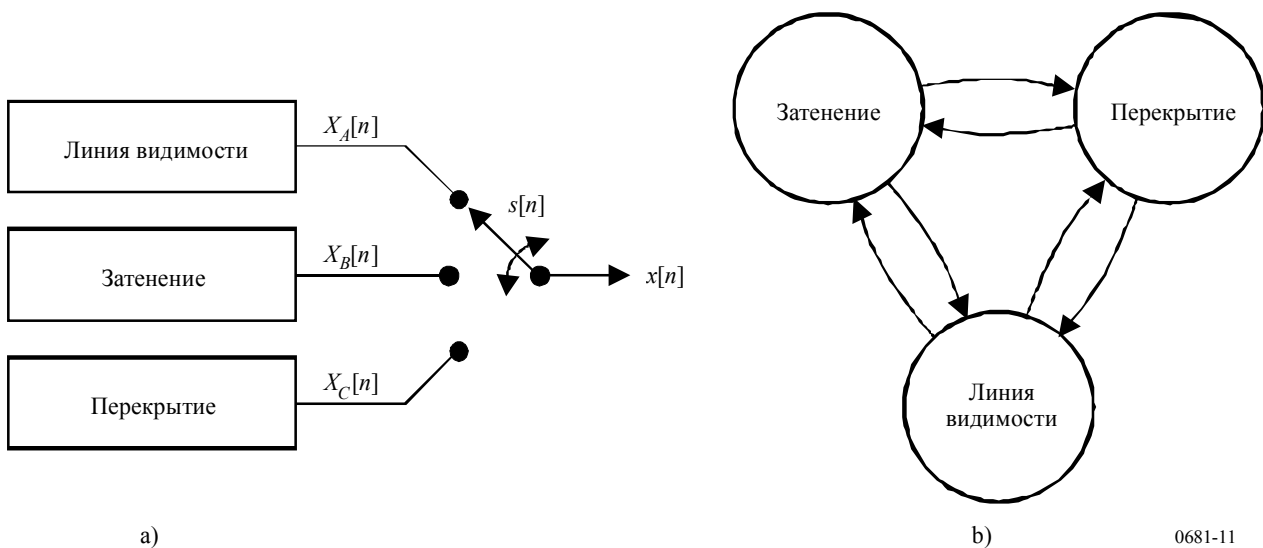
## 6 Статистическая модель для смешанных условий распространения

В пп. 4.1 и 5 представлены модели для особых условий, которыми являются затенение придорожными объектами и прямая видимость без затенения в горных условиях, а также условия затенения придорожной растительностью. В реальных условиях распространения СПСС, таких как городские и пригородные зоны, может возникать сочетание разных условий распространения. Кумулятивная функция распределения (CDF) уровней сигнала в таких комбинированных условиях может быть рассчитана на основе следующей модели с тремя состояниями, которая включает условия прямой видимости без затенения, условия слабого затенения и условия полного перекрытия. Это – статистическая модель, действительная для узкополосных СПСС, где частотная характеристика канала воздействует одинаковым образом на все частоты в пределах ширины полосы сигнала (не избирательные по частоте каналы).

Долговременные изменения принимаемого сигнала могут быть описаны цепочкой отдельных состояний. Основная идея скрытых цепочек отражена на рисунке 11а). Положение ключа определяет, какой из стохастических процессов  $x_i[n]$  наблюдается на выходе, где каждый процесс представляет конкретный сценарий распространения. Кратковременные изменения в пределах каждого состояния могут моделироваться с помощью аналоговых моделей каналов. Три состояния используются для представления условий прямой видимости, затенения и перекрытия. Произвольный процесс  $s[n]$  представляет положение ключа, состояние которого характеризуется полу-Марковской цепью, диаграмма перехода состояний которой представлена на рисунке 11б).

РИСУНОК 11

Генерирование наблюдаемой последовательности а) и диаграмма перехода состояний полу-Марковской цепи б)



### 6.1 Прогнозирование статистики замираний для линии связи с одним спутником

Представленная ниже процедура позволяет оценить общую статистику замираний на линии распространения СПСС для частот до 30 ГГц при угле места от  $10^\circ$  до  $90^\circ$ . Вместе с тем, приведенные здесь предлагаемые значения параметров ограничивают применимый диапазон частот до 1,5–2,5 ГГц в городской и пригородной зонах. Усиление приемной антенны предполагается меньше, чем приблизительно 10 дБи.

Определения состояний распространения:

*Состояние А:* условия прямой видимости без затенения;

*Состояние В:* условия слабого затенения (деревьями и/или небольшими препятствиями, такими как опоры линий электропередачи);

*Состояние С:* условия полного перекрытия (крупными препятствиями, такими как горы и здания).

Необходимы следующие параметры:

$P_A, P_B$  и  $P_C$ : вероятность возникновения состояний А, В и С;

$M_{r,A}, M_{r,B}$  и  $M_{r,C}$ : средняя мощность многолучевого сигнала в условиях состояний А, В и С;

$m$  и  $\sigma$ : среднее и стандартное отклонение величины замираний сигнала (дБ) для компонента прямой волны в состоянии В;

$\theta$ : угол места (град.).

Рекомендуемые значения вышеуказанных параметров как функция  $\theta$  (град.) определяются следующим образом:

$$P_A = 1 - a(90 - \theta)^2 \quad \text{для } 10^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, \quad (14a)$$

где

$$\begin{aligned} a &= 1,43 \times 10^{-4} && \text{для городской зоны,} \\ &= 6,0 \times 10^{-5} && \text{для пригородной зоны} \\ P_B &= b P_C, && (14b) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} b &= 1/4 && \text{для городской зоны,} \\ &= 4 && \text{для пригородной зоны} \end{aligned}$$

и где

$$P_C = (1 - P_A) / (1 + b) \quad (14c)$$

и

$$m = -10 \text{ дБ} \quad \sigma = 3 \text{ дБ}$$

$$M_{r,B} = 0,03162 (= -15 \text{ дБ}) \quad M_{r,C} = 0,01 (= -20 \text{ дБ}).$$

Предлагаемое значение  $M_{r,A}$  зависит от указанного ниже типа области. Для углов места между  $10^\circ$  и  $45^\circ$  это значение может быть получено путем линейной интерполяции или экстраполяции значений в дБ при  $\theta = 30^\circ$  и  $\theta = 45^\circ$ .

Для городской зоны:

$$\begin{aligned} M_{r,A} &= 0,158 (= -8 \text{ дБ}) && \text{для } \theta = 30^\circ \\ &= 0,100 (= -10 \text{ дБ}) && \text{для } \theta \geq 45^\circ \end{aligned}$$

и для пригородной зоны:

$$\begin{aligned} M_{r,A} &= 0,0631 (= -12 \text{ дБ}) && \text{для } \theta = 30^\circ \\ &= 0,0398 (= -14 \text{ дБ}) && \text{для } \theta \geq 45^\circ. \end{aligned}$$

Ниже приведена пошаговая процедура:

*Шаг 1:* Рассчитывается кумулятивное распределение уровня сигнала  $x$  в состоянии А ( $x = 1$  для компонента прямой волны):

$$f_A(x \leq x_0) = \int_0^{x_0} \frac{2x}{M_{r,A}} \exp\left(-\frac{1+x^2}{M_{r,A}}\right) I_0\left(\frac{2x}{M_{r,A}}\right) dx, \quad (15)$$

где  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Это распределение является распределением Никагами-Райса с  $a = 1$  и  $2\sigma^2 = M_{r,A}$ , описанное в Рекомендации МСЭ-Р Р.1057.

*Шаг 2:* Рассчитывается кумулятивное распределение уровня сигнала  $x$  в состоянии В:

$$f_B(x \leq x_0) \frac{6,930}{\sigma M_{r,B}} \int_0^{x_0} x \int_\epsilon^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{[20 \log(z) - m]^2}{2\sigma^2} - \frac{x^2 + z^2}{M_{r,B}}\right] I_0\left(\frac{2xz}{M_{r,B}}\right) dz dx, \quad (16)$$

где  $\epsilon$  является весьма малым, но отличным от нуля значением (предлагается  $\epsilon = 0,001$ ).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Это распределение известно как распределение Лу.

Шаг 3: Рассчитывается кумулятивное распределение уровня сигнала  $x$  в состоянии С:

$$f_C(x \leq x_0) = 1 - \exp\left(-\frac{x_0^2}{M_{r,C}}\right). \quad (17)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Это реелевское распределение с  $2q^2 = M_{r,C}$ , описанное в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

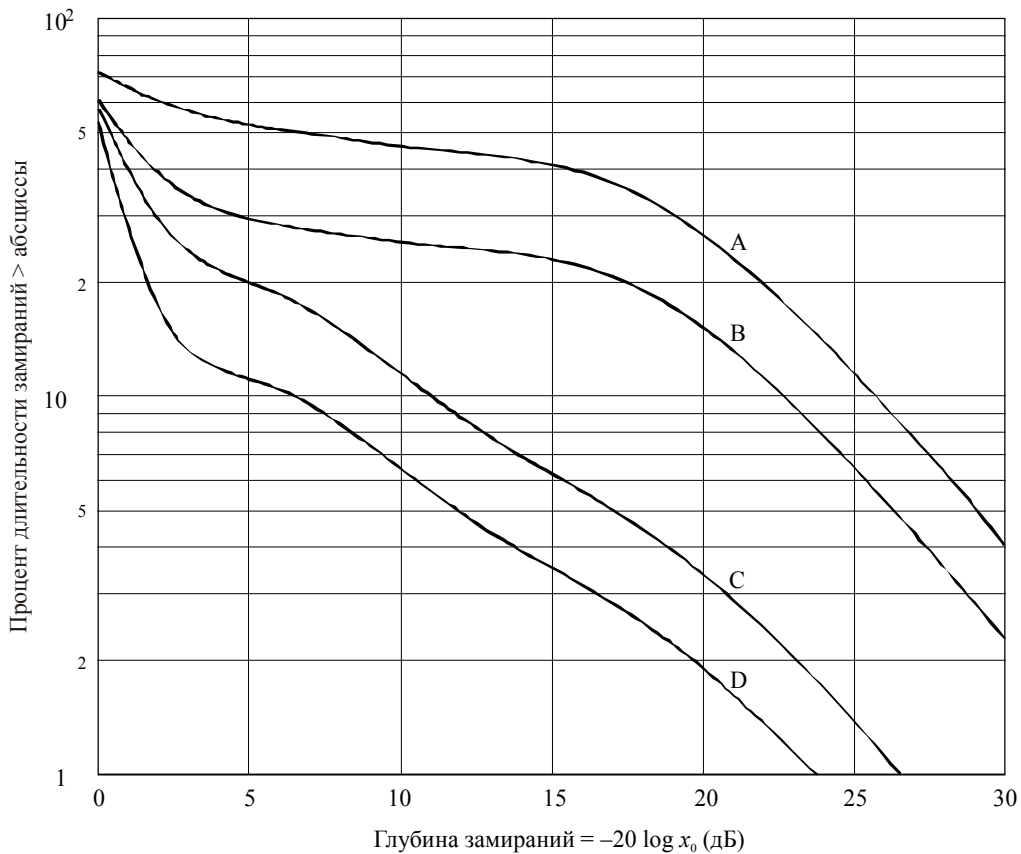
Шаг 4: Функция CDF, в которой уровень сигнала  $x$  меньше порогового уровня  $x_0$  с вероятностью  $P$  в смешанных условиях распространения, может быть определена следующим образом:

$$P(x \leq x_0) = P_A f_A + P_B f_B + P_C f_C. \quad (18)$$

На рисунке 12 показаны примеры рассчитанных функций CDF для значений параметров, данных выше, значение вероятности преобразовано в значение процентов времени.

РИСУНОК 12

Примеры расчета глубины замирания в городской и пригородной зонах при углах места  $30^\circ$  и  $45^\circ$  (1,5–2,5 ГГц, усиление антенны  $\leq 10$  дБ)



Кривые A: городская зона,  $30^\circ$   
 B: городская зона,  $45^\circ$   
 C: пригородная зона,  $30^\circ$   
 D: пригородная зона,  $45^\circ$

## 6.2 Прогноз статистики продолжительности состояний для одной линии связи

Для имитации и оценки характеристик приемников СПСС необходимо знать продолжительность по времени или, что то же самое, расстояние, пройденное в каждом из трех состояний, классифицируемых как открытое, затененное и перекрытое. Наряду с вероятностью перехода состояний в модели полу-Маркова состояния для имитации канала СПСС для одного спутника ГСО может использоваться распределение продолжительности состояния.

Распределение продолжительности  $D$  (м) нахождения в каждом из состояний А, В и С было выведено на основании результатов набора придорожных измерений, выполненных в Соединенном Королевстве в зимние месяцы, в которых использовалась частота примерно 1,5 ГГц и спутник ГСО. Измерения проводились в пригородах Лондона в двух разных условиях: пригород, в котором имеются открытые области, неплотно окруженные деревьями дороги и двухэтажные дома; и густо покрытый лесом пригород. Угол места на спутник составлял  $29^\circ$  для одного набора измерений в пригороде и лесной зоне (пригород (I) и лесная зона) и  $13^\circ$  для второго набора измерений в пригороде (пригород (II)). Использовалась всенаправленная антенна, установленная на автофургоне. Для сортировки результатов измерений по трем состояниям в отношении среднего уровня мощности применялись пороговые значения 5 и 10 дБ (см. таблицу 5).

На основании сравнения с длительностью замираний и длительностью незамираний, данными в п. 4.1, были получены следующие распределения продолжительности состояния:

Распределение степенного типа для продолжительности состояния А:

$$P_A(D \leq d) = 1 - \beta d^{-\gamma}, \quad (19)$$

где параметры  $\beta$  и  $\gamma$  зависят от степени оптического затенения и  $d > \beta^{1/\gamma}$ .

Распределение продолжительности для состояний В и С является логарифмически нормальной моделью, действительной для  $d \geq 0,1$  м:

$$P_{B,C}(D \leq d) = (1 + \operatorname{erf}[(\ln(d) - \ln(\alpha)) / \sqrt{2\sigma}]) / 2, \quad (20)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение  $\ln(d)$ ,  $\ln(\alpha)$  – среднее значение  $\ln(d)$ , а  $\operatorname{erf}$  – определено в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Выведенные значения параметров для распределений продолжительности трех состояний и соответствующие вероятности перехода состояний представлены в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5

Параметры для распределений продолжительности состояний и вероятностей перехода состояний

Условия	Состояние А		Состояние В		Состояние С		Вероятности перехода состояний					
	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\sigma$	$\alpha$	$\sigma$	$P_{A \rightarrow B}$	$P_{A \rightarrow C}$	$P_{B \rightarrow A}$	$P_{B \rightarrow C}$	$P_{C \rightarrow A}$	$P_{C \rightarrow B}$
Пригород (I)	0,88	0,61	1,73	1,11	2,62	0,98	1	0	0,65	0,35	0	1
Пригород (II)	0,83	0,66	1,89	0,93	3,28	1,04	1	0	0,65	0,35	0	1
Лесная зона	0,60	0,84	2,05	1,05	1,55	1,02	1	0	0,42	0,58	0	1

## 7 Физико-статистическая широкополосная модель для смешанных условий распространения

В п. 6 приведена статистическая узкополосная модель для СПСС в различных условиях. Для широкополосных СПСС с каналом многолучевого распространения, где канал по-разному воздействует на разные частоты в пределах ширины полосы сигнала (частотно-избирательные каналы), более пригодна генеративная модель, реализующая линейный трансверсальный фильтр, выходным параметром которого является сигнал, представляющий собой сумму задержанного входного сигнала, ослабленного входного сигнала и входного сигнала с доплеровским сдвигом частоты (широкополосная модель). Определения терминов, связанных с многолучевым распространением, содержатся в Рекомендации МСЭ-R P.1407.

Модель применима к ситуации, когда спутник, находясь в известной позиции, ведет передачу сигналов на приемник на земле, а угол места  $\epsilon$  и азимут  $\phi$  могут быть вычислены относительно направления и позиции приемника. Модель применима для частот между 1 и 2 ГГц и справедлива для широкополосных систем с шириной полосы до 100 МГц. Модель базируется на детерминистических и стохастических параметрах и может генерировать векторы, включающие временные ряды комплексных огибающих прямого и отраженного сигналов, и соответствующие векторы задержки на трассе. Параметры, определяющие стохастический режим модели, выводятся по результатам измерений, полученным для данного сценария. Геометрия модели основана на синтетическом представлении условий.

Модель канала содержит набор следующих частей (определенных для поддержки имитации реалистического режима распространения для большого числа представляющих интерес сценариев и проверенных далее путем эмпирического анализа на основе данных измерений):

- затенение прямого сигнала:
  - модуль фасада здания,
  - модуль дерева,
  - модуль легкой опоры;
- модуль отражений.

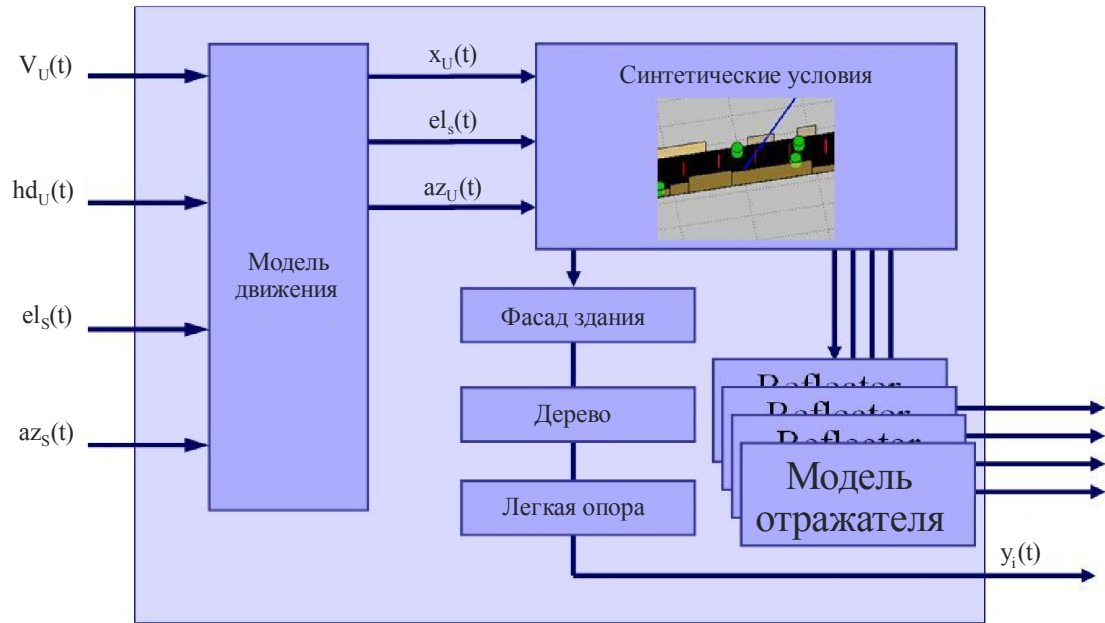
Структура модели представлена на рисунке 13, включая следующие входные, промежуточные и выходные изменяющиеся во времени сигналы:

- $v_u(t)$ : скорость движения пользователя;
- $hd_u(t)$ : направление движения пользователя;
- $el_s(t)$ : угол места спутника;
- $az_s(t)$ : азимут спутника;
- $x_u(t)$ : позиция пользователя по оси  $x$  (оси  $y$  и  $z$  считаются постоянными);
- $az_u(t)$ : азимут пользователя;
- $y_i(t)$ : выходные сигналы, где каждый  $i$  связан с прямым сигналом и отражателем.

Учитываемые в модели механизмы распространения и синтетические условия показаны на рисунке 14.

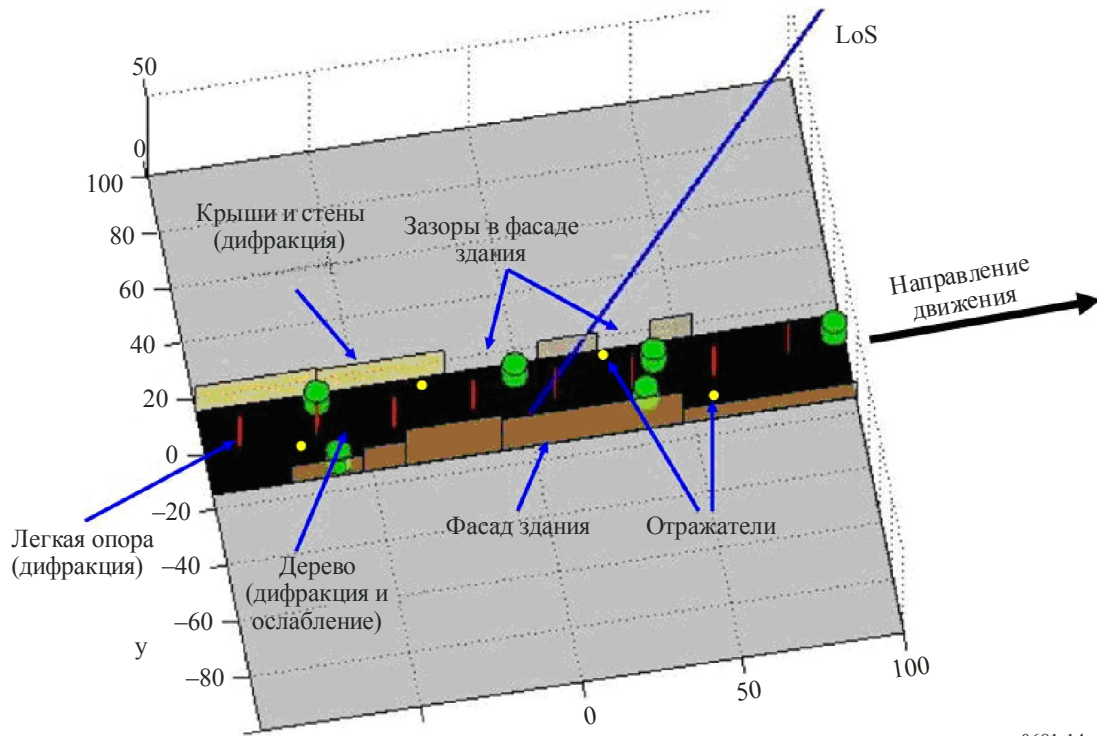
Структура модели действительна для нескольких сценариев: автотранспортное средство в городе, пешеход в городе, автотранспортное средство в пригороде, пешеход в пригороде. Модель построена на основании данных измерений в условиях городского и пригородного сценариев, проведенных в городе Мюнхене, Германия, и вблизи него. Программное обеспечение для реализации модели доступно на веб-сайте 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи. Полное описание реализации модели и ее использования содержатся в размещенном на веб-сайте указанной исследовательской комиссии МСЭ-R Отчете о физико-статистической модели широкополосной СПСС.

РИСУНОК 13  
Структура модели



0681-13

РИСУНОК 14  
Механизмы распространения и синтетические условия



0681-14



### 7.1 Входные параметры модели

Для каждой входной выборки должен быть задан ряд входных параметров модели:

- угол места спутника;
- азимут спутника;
- скорость движения пользователя;
- направление движения пользователя.

Следует заметить, что максимальная скорость пользователя ограничивается частотой дискретизации импульсной характеристики канала:

$$v < \frac{c_0 f_{\text{samp}}}{2f_c}, \quad (21)$$

где

- $f_{\text{samp}}$  : частота дискретизации;
- $f_c$  : несущая частота;
- $c_0$  : скорость света.

Рекомендуется использовать корректный коэффициент передискретизации, например 4.

### 7.2 Выходные параметры модели

Выходными параметрами модели являются вектор  $N$  задержек  $\tau_i$  на трассе и  $N$  комплексных значений  $A_i(t)$  для каждого момента времени. Эквивалентная импульсная характеристика канала группового сигнала определяется следующим образом:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)), \quad (22)$$

где  $t$  и  $\tau$  означают оси времени и задержки, соответственно. Следует заметить, что задержки на трассе  $\tau_i(t)$  являются переменными во времени и могут достигать произвольных значений.

### 7.3 Использование выходных параметров модели

Пусть  $s(t)$  – передаваемый эквивалентный групповой сигнал, тогда принимаемый сигнал  $r(t)$  может быть рассчитан обычным образом путем конволюции передаваемого сигнала с импульсной характеристикой канала следующим образом:

$$r(t) = s(t) * h(t, \tau). \quad (23)$$

Импульсные характеристики канала как выходные параметры модели обновляются со скоростью, задаваемой  $f_{\text{samp}}$ .

## 8 Разнесение спутников

В предыдущих разделах рассматривались линии связи с одним спутником. Для улучшения показателя готовности в системах с несколькими спутниками может использоваться разнесение линий связи. В данном разделе рассматривается объединение/коммутирование сигналов, поступающих от разных спутников. Рассматриваются два случая: случай отсутствия корреляции, когда предполагается, что последствия затенения, затрагивающие принимаемые сигналы от видимых спутников, являются некоррелированными; и случай наличия корреляции, когда существует определенная степень корреляции. В обеих ситуациях обуславливаемые многолучевостью отклонения сигнала рассматриваются как некоррелированные.

### 8.1 Случай отсутствия корреляции

Модель, представленная в разделе 6, обладает возможностью оценки воздействия разнесения спутников в случае группировок спутников, в которых видимыми являются несколько спутников (т. е. происходит переключение на наименее поврежденную трассу). Для систем ГСО вероятности возникновения каждого состояния для каждой спутниковой линии связи, т. е.  $P_{An}$ ,  $P_{Bn}$  и  $P_{Cn}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – число видимых спутников), зависят от угла места каждого спутника  $\theta_n$ . Вероятности возникновения состояния после разнесения на основе выбора состояния,  $P_{A:div}$ ,  $P_{B:div}$  и  $P_{C:div}$ , определяются следующим образом:

$$P_{A:div} = 1 - \prod_{n=1}^N [1 - P_{An}(\theta_n)], \quad (24a)$$

$$P_{B:div} = 1 - P_{A:div} - P_{C:div}, \quad (24b)$$

$$P_{C:div} = \prod_{n=1}^N [P_{Cn}(\theta_n)]. \quad (24c)$$

В случае систем НГСО, таких как ОЗО и СОО, вероятности возникновения различных состояний для каждой спутниковой линии связи изменяются во времени в зависимости от изменяемых во времени значений угла места спутников. Среднее значение вероятности возникновения состояния,  $\langle P_{A:div} \rangle$ ,  $\langle P_{B:div} \rangle$  и  $\langle P_{C:div} \rangle$ , после разнесения рабочих спутников в период времени от  $t_1$  до  $t_2$  определяются следующим образом:

$$\langle P_{i:div} \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{i:div}(t) dt \quad (i = A, B \text{ или } C). \quad (25)$$

Заменив  $P_A$ ,  $P_B$  и  $P_C$  в уравнении (11) на  $P_{A:div}$ ,  $P_{B:div}$  и  $P_{C:div}$  (в случае систем ГСО) или  $\langle P_{A:div} \rangle$ ,  $\langle P_{B:div} \rangle$  и  $\langle P_{C:div} \rangle$  (в случае систем НГСО), кумулятивная функция распределения после разнесения спутников на основе выбора состояния может быть рассчитана аналогичным образом. В этом случае другие значения параметров должны сохраняться постоянными при  $\theta = 30^\circ$  для промежуточного использования.

### 8.2 Случай наличия корреляции

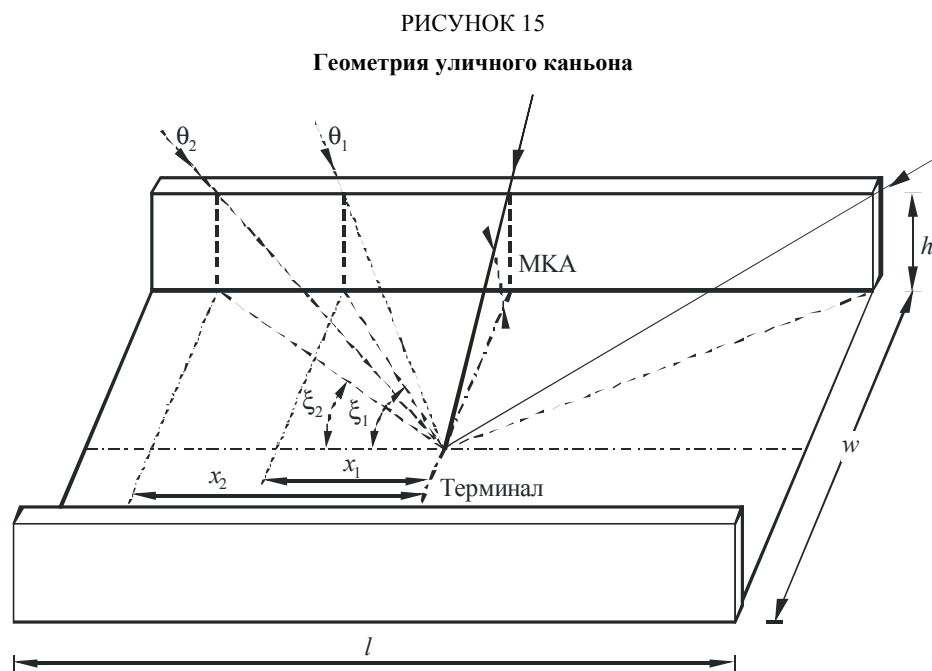
Во многих случаях события затенения, затрагивающие две линии связи с данным угловым разносом, представляют определенную степень корреляции, которую необходимо оценить количественно для обеспечения более точных оценок общей готовности, ожидаемой в отношении системы с несколькими спутниками. Для этой цели используется коэффициент кросс-корреляции затенения. Этот параметр может принимать значения в диапазоне  $\pm 1$  начиная от положительного значения, близкого к +1, для малого углового разноса, до даже отрицательных значений для больших величин углового разноса.

#### 8.2.1 Количественная оценка коэффициента кросс-корреляции затенения в городских зонах

Ниже описывается простая трехсегментная модель количественной оценки коэффициента корреляции между событиями затенения в городских зонах. Используется коническая геометрия городской зоны – "уличный каньон". Задача заключается в количественном определении коэффициента кросс-корреляции  $\rho(\gamma)$ , при этом  $\gamma$  является угловым разносом между двумя отдельными линиями связи спутник-подвижный терминал в уличных каньонах, которые описаны с помощью их МКА.

Геометрия представлена на рисунке 15, где:

- $\theta_1, \theta_2$ : угол места спутника;
- $w$ : средняя ширина улицы;
- $h$ : средняя высота здания;
- $l$ : длина рассматриваемой улицы.



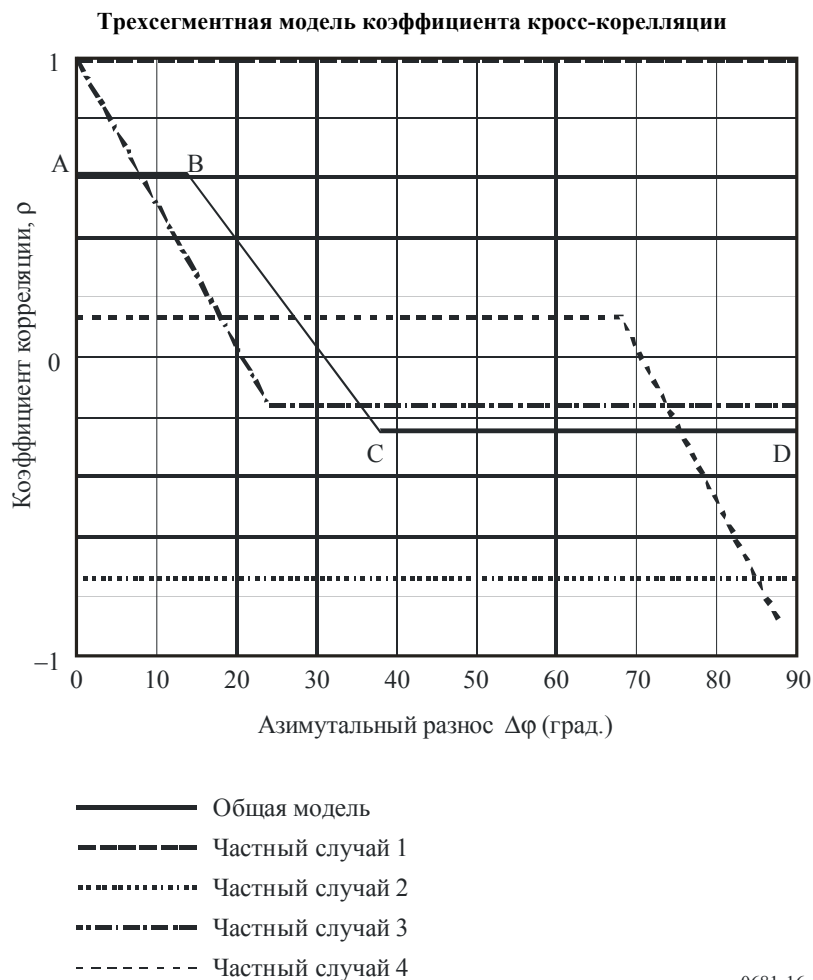
0681-15

Угловой разнос между двумя линиями связи,  $\gamma$ , может быть выражен в более традиционных угловых терминах: углы места двух спутников,  $\theta_i$  и  $\theta_j$ , и разнос по азимуту между ними,  $\Delta\varphi$ , т. е. коэффициент кросс-корреляции затенения может быть выражен как  $\rho(\theta_i, \theta_j, \Delta\varphi)$ .

На рисунке 16 схематически представлены типовые результаты, полученные с помощью данной модели, на которой показан общий режим в виде трехсегментной диаграммы, обозначенной точками А, В, С и D. В дополнение к этой общей диаграмме представлены несколько частных случаев, в которых объединены две или более из этих четырех точек.

На рисунке 16 показано, что, в целом, обычно существуют главный лепесток положительных уменьшающихся значений кросс-корреляции для малого азимутального разноса (как правило,  $\Delta\varphi < 30^\circ$ ), в то время как для больших значений  $\Delta\varphi$  этот коэффициент стремится принять постоянное отрицательное значение. Этот лепесток представляет высший максимум, когда два спутника находятся на одинаковых углах места. При увеличении разницы между углами места ( $\theta_i \gg \theta_j$ ) лепесток будет показывать значительно более низкий максимум.

РИСУНОК 16



0681-16

Также были определены частные случаи данной трехсегментной модели: частный случай 1 возникает, когда оба спутника находятся выше МКА для любого азимутального разноса. В этом случае коэффициент корреляции принимает постоянное положительное значение +1 для любого  $\Delta\phi$ . Это нерелевантный случай, поскольку в этой ситуации не требуется разнесение спутников. Частный случай 2 возникает, когда один спутник всегда находится выше МКА, а другой – всегда ниже МКА (за исключением обоих концов каньона). В этом случае коэффициент корреляции принимает постоянное отрицательное значение. Частный случай 3 возникает, когда два спутника находятся на том же угле места. В этой ситуации лепесток корреляции начинает уменьшаться относительно своего максимального значения, равного +1 (то есть, спутники расположены под одним и тем же углом). Этот частный случай применим к системам, базирующимся на спутниках ГСО, имеющих широкий разнос по азимуту, но весьма сходные углы места. Наконец, частный случай 4 возникает, когда спутники имеют очень разные углы места ( $\theta_i \gg \theta_j$ ). В этом случае лепесток корреляции расширяется на очень широкий диапазон значений азимутального разноса, но показывает малые положительные корреляционные значения.

Следует отметить, что, учитывая геометрию данного сценария (уличный каньон) и допущение о том, что пользователь находится в середине улицы, корреляционные значения являются симметричными для всех четырех квадрантов  $\Delta\phi$ ; поэтому на рисунке 16 показан только один квадрант.

Что касается рисунка 15, в модели использовались следующие входные параметры: углы места спутников,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (град.), средняя высота здания,  $h$  (м), средняя ширина улицы,  $w$  (м), и длина рассматриваемой улицы,  $l$  (м). Для этого последнего параметра рекомендуется выбирать большое значение, т. е.  $l \geq 200$  м. Далее, предполагается, что  $\theta_2 \geq \theta_1$ . Разрешение азимутального разноса в модели,  $\Delta\phi$ , составляет  $1^\circ$  и действительно для всех полос частот, хотя оно становится более точным для полос частот выше 10 ГГц.

Для расчета значений коэффициента кросс-корреляции и азимутального разнеса, соответствующих точкам модели А, В, С и D, необходимо выполнить следующие шаги:

*Шаг 1:* Расчет дополнительных значений  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $M_1$  и  $M_2$  и углов  $\xi_1$  и  $\xi_2$  (см. рисунок 15):

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{h}{\tan \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad \text{и} \quad x_2 = \sqrt{\left(\frac{h}{\tan \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2}. \quad (26)$$

- Если  $(x_{1,2})^2 < 0$  перейти к шагу 6. Эта ситуация возникает, когда спутник 1 и/или 2 всегда находится в условиях прямой видимости для любого азимутального разнеса.
- Если  $x_{1,2} > l/2$ , установить  $x_{1,2} = l/2$ . Эта ситуация возникает, если спутник 1 и/или 2 является видимым только на обоих концах улицы.

$$\xi_1 = \text{round}\left(\arctan \frac{w/2}{x_1}\right) \quad \text{и} \quad \xi_2 = \text{round}\left(\arctan \frac{w/2}{x_2}\right). \quad (27)$$

$$M_1 = \frac{\xi_1 + 0,5}{90} \quad \text{и} \quad M_2 = \frac{\xi_2 + 0,5}{90}, \quad (28)$$

где "round" означает округление до ближайшей целой величины (град.).

*Шаг 2:* Расчет дополнительных данных, связанных с точками А и D модели.

Для точки А:

$$N_{11} = 4\xi_1 + 2 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad N_{01} = 4(\xi_2 - \xi_1) \quad N_{10} = 0. \quad (29)$$

Для точки D:

- если  $\xi_1 + \xi_2 \leq 90$ ,

$$N_{11} = 0 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_1 - 4\xi_2 - 4 \quad N_{01} = 4\xi_2 + 2 \quad N_{10} = 4\xi_1 + 2; \quad (30a)$$

- если  $\xi_1 + \xi_2 > 90$ ,

$$N_{11} = 4\xi_1 + 4\xi_2 + 4 - 360 \quad N_{00} = 0 \quad N_{01} = 360 - 4\xi_1 - 2 \quad N_{10} = 360 - 4\xi_2 - 2. \quad (30b)$$

*Шаг 3:* Расчет коэффициента кросс-корреляции в точках А и D:

$$\rho_{A,D} = \frac{1}{359} \frac{N_{11}(1-M_1)(1-M_2) + N_{00}(0-M_1)(0-M_2) + N_{10}(1-M_1)(0-M_2) + N_{01}(0-M_1)(1-M_2)}{\sigma(\theta_1)\sigma(\theta_2)}; \quad (31)$$

$$\sigma^2(\theta_1) = \frac{(4\xi_1 + 2)(1-M_1)^2 + (360 - 4\xi_1 - 2)(0-M_1)^2}{359}; \quad (32a)$$

$$\sigma^2(\theta_2) = \frac{(4\xi_2 + 2)(1-M_2)^2 + (360 - 4\xi_2 - 2)(0-M_2)^2}{359}. \quad (32b)$$

*Шаг 4:* В точке В коэффициент корреляции такой же, как и в точке А, а разнос по азимуту,  $\Delta\varphi$ , определяется следующим образом:

$$\text{Азимут}_{\text{Точка В}} = \xi_2 - \xi_1 \quad \text{град.} \quad (33)$$

*Шаг 5:* В точке С коэффициент корреляции такой же, как и в точке D, а разнос по азимуту,  $\Delta\varphi$ , определяется следующим образом:

$$- \quad \text{если } \xi_1 + \xi_2 \leq 90, \quad \text{Азимут}_{\text{Точка С}} = \xi_1 - \xi_2 \quad \text{град.} \quad (34a)$$

$$- \quad \text{если } \xi_1 + \xi_2 > 90, \quad \text{Азимут}_{\text{Точка С}} = 180 - \xi_1 - \xi_2 \quad \text{град.} \quad (34b)$$

*Шаг 6:* Это случай, когда для одного или обоих углов места всегда существуют условия прямой видимости. В этом случае коэффициент корреляции рассчитывается несколько иным образом по сравнению с шагом 3:

- если оба спутника всегда являются видимыми, коэффициент кросс-корреляции постоянный и равен +1 для любого  $\Delta\varphi$ ;
- если один из спутников всегда является видимым, коэффициент кросс-корреляции также постоянный и имеет следующий вид:

$$\rho = \left( \frac{N_{11}}{180} - 1 \right), \quad (35)$$

где  $N_{11} = 4\xi_1 + 2$ , а  $\xi_1$  рассчитывается также как на шаге 1.

### 8.2.2 Расчет готовности

После того как коэффициент кросс-корреляции определен, возможно вычислить, насколько улучшается показатель готовности в результате применения разнесения спутников. В данном пункте представлены выражения для расчета готовности системы при разнесении двух спутников. Учитывая малые, как правило, запасы (или диапазоны регулирования мощности), используемые в сухопутных подвижных спутниковых системах, необходимо рассматривать только воздействие затенения. Это обоснованная рабочая гипотеза, поскольку значения готовности будут соответствовать линиям связи в условиях прямой видимости, в каких случаях изменения, обуславливаемые многолучевостью, имеют райсовское распределение и, следовательно, весьма малы. В случае условий затенения (сильного или слабого) линии связи будут находиться в нерабочем состоянии, даже если многолучевость значительно усиливает сигнал.

Для двух линий с разнесом по углу, значениями вероятности неготовности,  $p_1$  и  $p_2$ , и коэффициентом кросс-корреляции затенения,  $\rho$ , общая невероятность готовности после применения разнесения спутников будет определяться следующим образом:

$$p_0 = \rho \sqrt{p_1(1-p_1)} \sqrt{p_2(1-p_2)} + p_1 p_2, \quad (36)$$

а вероятность готовности будет составлять  $1 - p_0$ . Действительные значения  $\rho$  в уравнении (36) ограничиваются значениями, обуславливающими неотрицательные значения для  $p_0$ . Вероятности  $p_1$  и  $p_2$  для городских зон могут быть рассчитаны с помощью модели, описанной в п. 4.2.

Общий расчет для данного временного интервала или для полного периода группировки требует расчета взвешенных средних значений по всем позициям (азимуты и углы места) двух спутников относительно терминала пользователя.

### 8.3 Моделирование воздействия разнесения спутников с использованием функций МКФ

В расчетах значений готовности систем с несколькими спутниками может использоваться функция МКФ, определение которой содержится в п. 4.4. В геометрии самого экранирования уже содержится возможная частичная корреляция влияния перекрытия между разными линиями связи. Рисунок 17 является иллюстрацией расчета готовности системы, в состав которой входят два спутника ГСО. Линии А–В и С–D показывают ход развертки, которому необходимо следовать при расчете суммарной готовности. Линия А–В показывает развертку азимута  $360^\circ$  при угле места  $\theta_1$ , соответствующему спутнику 1, а линия С–D показывает развертку азимута  $360^\circ$  при угле места  $\theta_2$ , соответствующему спутнику 2. Для учета возможной кросс-корреляции перекрытия развертка  $360^\circ$  должна выполняться с сохранением разнесения по азимуту,  $\Delta\varphi$ , между двумя спутниками.

Функции МКФ улицы также могут использоваться для систем с несколькими спутниками ГСО и в случае группировки спутников НГСО. В последнем случае исследования будут включать повторяющиеся расчеты разверток  $360^\circ$  направления ориентирования улицы для достаточно большого числа мгновенных состояний группировки спутников. Мгновенное состояние в данном контексте означает фактические позиции (азимуты и углы места) различных спутников выше минимального рабочего угла места,  $\theta_{min}$ . При определении соответствующих интервала шага,  $\Delta T$ , и периода наблюдения,  $T_{obs}$ , готовность может быть рассчитана как среднее, взвешенное по времени и ориентированию улицы значение полученных результатов для каждого мгновенного состояния. Достоверные результаты обеспечиваются значениями  $\Delta T=1$  мин. и  $T_{obs}$ , равного периоду группировки.

РИСУНОК 17

Расчет общей готовности системы для группировки,  
состоящей из двух спутников ГСО, относительно Т-образного перекрестка

