

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.682-2
(02/2007)

**Данные о распространении радиоволн,
необходимые для проектирования
воздушных 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/publ/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
P	Распространение радиоволн
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, 2011 г.

© ITU 2011

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.682-2

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

(Вопрос МСЭ-R 207/3)

(1990-1992-2007)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описаны явления распространения, имеющие особое значение для систем воздушной подвижной спутниковой связи. Определены соответствующие ухудшения связи, вызываемые ионосферой и тропосферой, и даются ссылки на Рекомендации МСЭ-R, содержащие руководящие указания относительно этих явлений. Представлены модели, позволяющие прогнозировать явления распространения, обуславливаемые многолучевостью сигнала вследствие отражения от поверхности Земли и рассеянием.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

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

рекомендует,

1 чтобы для текущего использования при планировании воздушных подвижных систем связи Земля-космос в дополнение к методам, изложенным в Рекомендации МСЭ-R P.618, были приняты методы, приведенные в Приложении 1.

Приложение 1**1 Введение**

Явления распространения в воздушной подвижной спутниковой службе отличаются от таковых в фиксированной спутниковой службе, потому что:

- на воздушных судах используются антенны небольших размеров, и корпус воздушного судна может оказывать влияние на рабочие характеристики антенны;
- большие скорости воздушных судов приводят к значительному доплеровскому расширению;
- оконечные устройства на воздушных судах должны обеспечивать большой динамический диапазон при передаче и приеме;
- безопасность воздушного судна требует высокой чистоты связи, что обуславливает важность отсутствия даже кратковременных ее нарушений, и требования к надежности связи должны выполняться, несмотря на маневры с креном и трехмерное движение.

В настоящем Приложении обсуждаются данные и модели, особо необходимые для того, чтобы охарактеризовать ухудшения связи на трассе, которые включают:

- тропосферные явления, в том числе ослабление в атмосферных газах, облаках и дожде, ослабление в тумане, рефракцию и мерцания;
- ионосферные явления, такие как мерцания;
- явления отражения от поверхности (многолучевость);
- влияние окружающей среды (движение воздушного судна, состояние моря, тип земной поверхности).

Воздушные подвижные спутниковые системы могут работать на всемирной основе, включая трассы распространения с низкими углами места. Был проведен ряд измерений параметров многолучевого распространения на трассах над сушей и морем. Для сравнения результатов измерений и подтверждения параметров модели в некоторых случаях использовалось лабораторное моделирование. Принимаемый сигнал рассматривается в аспекте его возможных составляющих: прямой сигнал, подверженный влиянию атмосферы, и отраженная волна, которая содержит главным образом диффузную составляющую.

Весьма интересным представляется использование для воздушных спутниковых систем частотного диапазона вблизи 1,5 ГГц. Поскольку большинство экспериментов проводилось именно в этом диапазоне, данные, содержащиеся в настоящей Рекомендации, применимы главным образом к этим частотам. Учитывая тот факт, что воздушные системы развиваются, следует ожидать, что можно будет использовать также и другие частоты.

2 Тропосферные явления

Важным параметром для воздушных служб является высота, на которой находится подвижная антенна. Оценки тропосферного ослабления можно получить с помощью методов, описанных в Рекомендации МСЭ-R P.618.

Принимаемый сигнал может подвергаться воздействию как крупномасштабной рефракции, так и мерцаний, вызванных турбулентностью атмосферы. Для воздушных судов на больших высотах влияние этих факторов уменьшается.

3 Ионосферные явления

Ионосферные явления на наклонных трассах обсуждаются в Рекомендации МСЭ-R P.531. Эти явления важны для многих трасс на частотах ниже примерно 10 ГГц, особенно в пределах $\pm 15^\circ$ относительно геомагнитного экватора, и в меньшей степени – в зонах полярного сияния и полярных шапок. Пик ионосферных явлений приходится на период максимального числа солнечных пятен.

Ухудшение связи, вызываемое ионосферой, не будет уменьшаться на высотах, обычно используемых воздушными судами. В Рекомендации МСЭ-R P.680 приводится краткое описание ионосферных явлений, представляющих особый интерес для подвижных спутниковых систем. Для большинства систем наиболее значительным источником ухудшения связи будет, по всей вероятности, ионосферное мерцание. В таблице 1 Рекомендации МСЭ-R P.680 приведены оценки максимальных ожидаемых ионосферных явлений на частотах до 10 ГГц для трасс с углом места, равным 30° .

4 Замирание вследствие отражения от поверхности и рассеяния

4.1 Общие соображения

В случае воздушных подвижных спутниковых систем замирания из-за многолучевости, вызванной отражением от поверхности, отличаются от замираний для других подвижных спутниковых систем, поскольку скорость и высота воздушного судна значительно больше, чем у других подвижных площадок.

4.2 Замирания вследствие отражения от морской поверхности

Характеристики замираний для воздушных систем могут анализироваться с помощью методов, аналогичных применяемым в морских системах, описанных в Рекомендации МСЭ-R P.680, при этом следует тщательно учитывать сферичность Земли, которая становится существенным фактором при увеличении высоты антенны над отражающей поверхностью.

4.2.1 Зависимость от высоты и усиления антенны

Следующий простой метод, основанный на теоретической модели, позволяет получить оценки мощности многолучевого сигнала или глубины замираний и может быть использован для инженерных применений.

Процедура состоит из следующих этапов:

Диапазон применения:

Частота: 1–2 ГГц
Угол места: $\theta_i \geq 3^\circ$ и $G(1,5\theta_i) \geq -10$ дБ,

где $G(\theta)$ – диаграмма направленности главного лепестка антенны, определяемая как:

$$G(\theta) = -4 \times 10^{-4} (10^{G_m/10} - 1) \theta^2 \quad \text{дБ}, \quad (1)$$

где:

G_m : значение максимального усиления антенны (дБ);

θ : угол, измеренный относительно осевого направления антенны (градусы).

Поляризация: круговая и горизонтальная; вертикальная поляризация при $\theta_i \geq 8^\circ$

Состояние моря: высота волны 1–3 м (некогерентная составляющая полностью присутствует).

Шаг 1: Рассчитать углы скользящего падения в точке зеркального отражения, θ_{sp} , и на линии горизонта, θ_{hr} , с помощью следующих формул:

$$\theta_{sp} = 2 \gamma_{sp} + \theta_i \quad \text{градусы} \quad (2a)$$

$$\theta_{hr} = \cos^{-1} [R_e / (R_e + H_a)] \quad \text{градусы}, \quad (2b)$$

где:

$$\gamma_{sp} = 7,2 \times 10^{-3} H_a / \tan \theta_i$$

R_e : радиус Земли = 6371 км

H_a : высота антенны (км).

Шаг 2: Определить относительный коэффициент усиления антенны, G , в направлении средней точки между точкой зеркального отражения и горизонтом. Относительный коэффициент усиления антенны аппроксимируется уравнением (1), где $\theta = \theta_i + (\theta_{sp} + \theta_{hr})/2$ (градусы).

Шаг 3: Вычислить френелевский коэффициент отражения от поверхности моря:

$$R_H = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}} \quad \text{(для горизонтальной поляризации)} \quad (3a)$$

$$R_V = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}}{\sin \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}} \quad \text{(для вертикальной поляризации)} \quad (3b)$$

$$R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad \text{(для круговой поляризации)} \quad (3c)$$

$$\eta = \epsilon_r(f) - j60 \lambda \sigma(f),$$

где:

$\varepsilon_r(f)$: относительная диэлектрическая проницаемость поверхности на частоте f (из Рекомендации МСЭ-R P.527)

$\sigma(f)$: проводимость поверхности (С/м) на частоте f (из Рекомендации МСЭ-R P.527)

λ : длина волны в свободном пространстве (м).

Шаг 4: Вычислить коэффициент коррекции C_θ (дБ):

$$C_\theta = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta_{sp} \geq 7^\circ \\ \theta_{sp} - 7) / 2 & \text{при } \theta_{sp} < 7^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

Шаг 5: Вычислить коэффициент дивергенции D (дБ) за счет кривизны поверхности Земли:

$$D = -10 \log \left[1 + \frac{2 \sin \gamma_{sp}}{\cos \theta_{sp} \sin (\gamma_{sp} + \theta_i)} \right]. \quad (5)$$

Шаг 6: Средняя мощность некогерентно отраженных от морской поверхности волн, отнесенная к мощности прямой волны, P_r , определяется как:

$$P_r = G + R + C_\theta + D \quad \text{дБ}, \quad (6)$$

где:

$$R = 20 \log |R_i|,$$

где $R_i = R_H, R_V$ или R_C из уравнения (3).

Шаг 7: Считая, что глубина замирания распределяется по закону Накагами-Райса, определяем ее как:

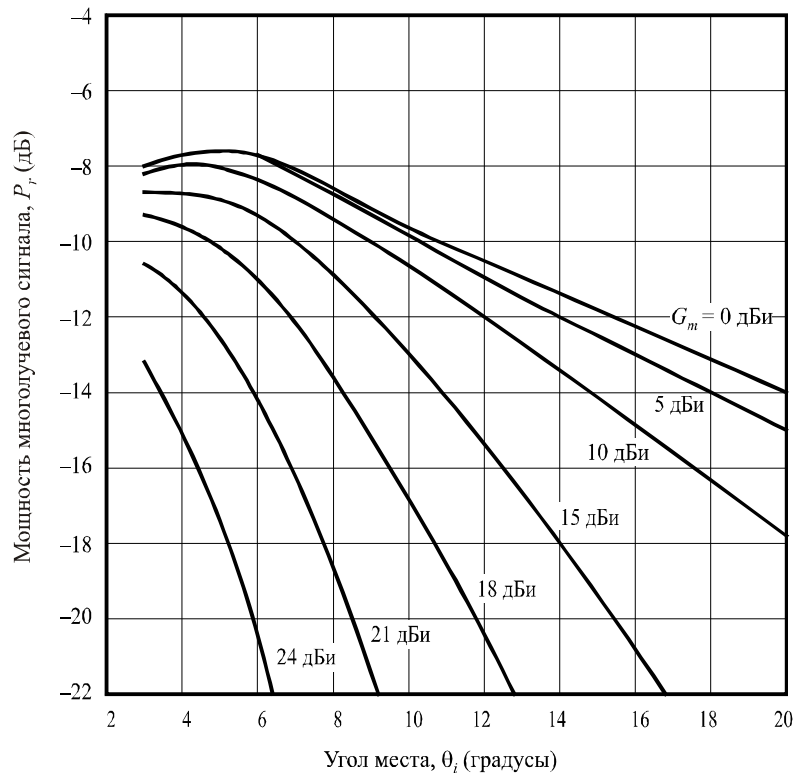
$$A + 10 \log (1 + 10^{P_r/10}), \quad (7)$$

где A – амплитуда (дБ), отложенная на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R P.680 по ординате.

На рисунке 1, ниже, показана средняя мощность многолучевой некогерентной составляющей, как функция угла места для различных усиления антенны, полученная с помощью описанной процедуры. Если сравнить эти результаты с морскими подвижными спутниковыми системами (рисунок 2 Рекомендации МСЭ-R P.680), то можно видеть, что мощность отраженной волны, P_r , для воздушных подвижных спутниковых систем при низких углах места уменьшается в этом случае на 1–3 дБ.

РИСУНОК 1

Зависимость средней мощности многолучевой составляющей, отнесенной к мощности прямого сигнала, от угла места при различных усилениях антенны



Частота = 1,54 ГГц
Круговая поляризация
 $H_a = 10$ км

0682-01

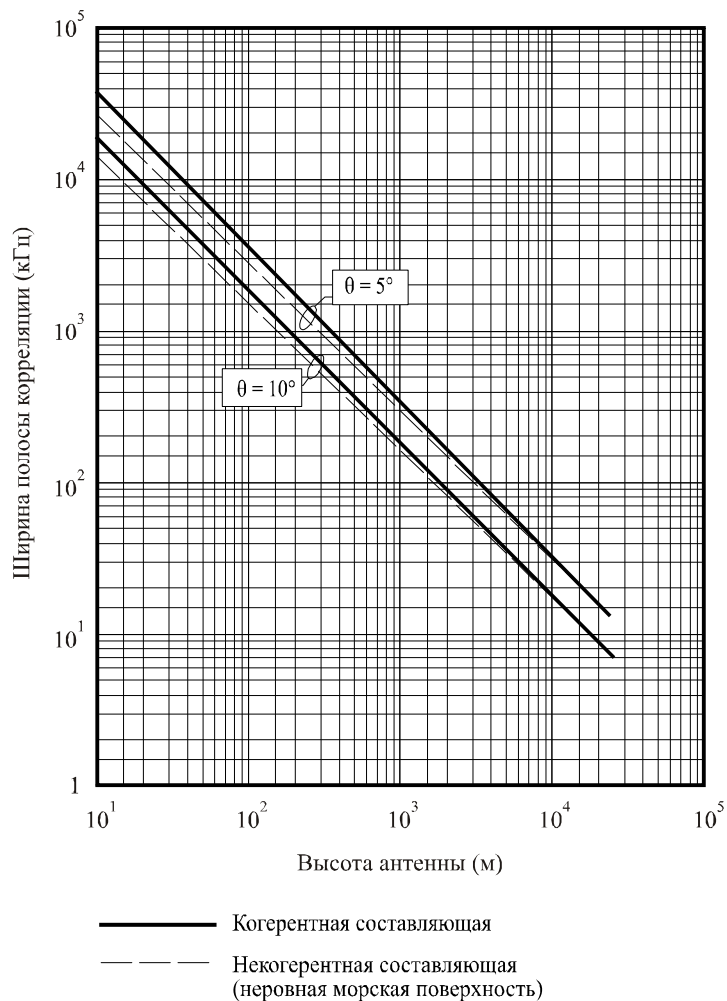
ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Аналитические и экспериментальные исследования показали, что для волн с круговой поляризацией на частоте 1,5 ГГц или около нее и при усилении антенны, равном 7 дБ, глубина замираний из-за многолучевости над спокойным морем составляет приблизительно от 8 до 11 дБ для низких и средних высот воздушного судна и примерно от 7 до 9 дБ для больших высот (более 2 км). При усилении антенны 15 дБ глубина замираний из-за многолучевости примерно на 2 дБ меньше.

4.2.2 Время задержки и ширина полосы корреляции

Принимаемый сигнал состоит из прямой и отраженной волн. Поскольку отраженная составляющая испытывает большую задержку распространения, чем прямая, суммарный принимаемый сигнал может подвергаться частотно-селективным замираниям. Корреляция сигнала уменьшается с увеличением частотного разнеса. Зависимость корреляции от усиления антенны при усилениях ниже 15 дБ невелика. На рисунке 2 показано соотношение между высотой антенны и шириной полосы корреляции, определяемой здесь как частотный разнос, для которого коэффициент корреляции между двумя радиоволнами равен 0,37 ($1/e$). Ширина полосы корреляции уменьшается по мере увеличения высоты антенны, принимая значения примерно от 10 до 20 кГц (время задержки порядка 6–12 мкс) для антенны на высоте 10 км. Таким образом, замирания из-за многолучевости для воздушных систем могут иметь частотно-селективные характеристики.

РИСУНОК 2

Ширина полосы корреляции в зависимости от высоты антенны
при усилении антенны, равном 10 дБи



0682-02

4.3 Измерения явлений многолучевости при отражении от морской поверхности

В полосе частот от 1,5 до 1,6 ГГц были проведены обширные измерительные эксперименты. Результаты этих измерений суммированы в настоящем пункте и могут использоваться при проектировании систем связи.

В таблице 1 сведены данные измерений параметров многолучевого распространения над океаном, к которым добавлены результаты, полученные с помощью аналитической модели. Разбросы по задержке представлены в таблице шириной профиля распределения задержки мощности диффузно-рассеянного сигнала, приходящего на приемник. Ширина полосы корреляции, приведенная в таблице 1, равна ширине полосы автокорреляционной функции частоты по уровню 3 дБ (преобразование Фурье спектра задержки). Доплеровское расширение определяется по ширине доплеровской спектральной плотности мощности. Время декорреляции равно ширине временной автокорреляционной функции по уровню 3 дБ (обратное преобразование Фурье доплеровского спектра).

ТАБЛИЦА 1
**Параметры многолучевого распространения
 по измерениям над океаном**

Параметр	Диапазон измерений	Типичные значения при указанном угле места		
		8°	15°	30°
Нормированная мощность многолучевой составляющей (дБ) горизонтальная поляризация вертикальная поляризация	от -5,5 до -0,5 от -15 до -2,5	-2,5 -14	-1 -9	-1 -3,5
Разброс по задержке ⁽¹⁾ (мкс) по уровню 3 дБ по уровню 10 дБ	0,25–1,8 2,2–5,6	0,6 2,8	0,8 3,2	0,8 3,2
Ширина полосы корреляции ⁽²⁾ по уровню 3 дБ (кГц)	70–380	160	200	200
Допплеровское расширение ⁽¹⁾ (Гц) Геометрия плоскости по уровню 3 дБ по уровню 10 дБ Геометрия поперечной плоскости по уровню 3 дБ по уровню 10 дБ	4–190 13–350 79–240 180–560	5 44 40 ⁽³⁾ 79 180 80 ⁽³⁾	70 180 110 280	140 350 190 470
Время декорреляции ⁽²⁾ (мс) по уровню 3 дБ	1,3–10	7,5	3,2	2,2

⁽¹⁾ Двустороннее значение.

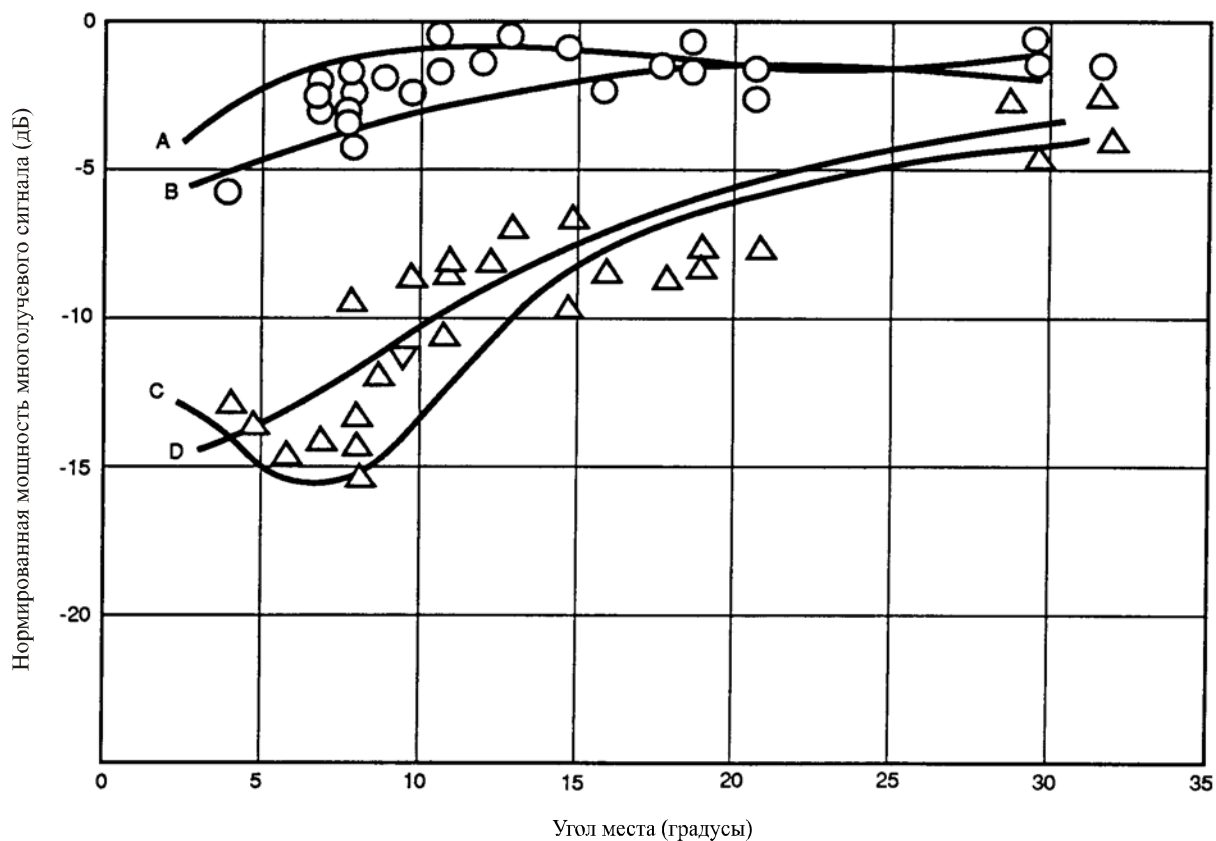
⁽²⁾ Одностороннее значение.

⁽³⁾ Данные, полученные по модели для многолучевого распространения при высоте полета воздушного судна 10 км и скорости 1000 км/час.

На рисунке 3 показаны кривые нормированной мощности многолучевого сигнала для антенн с горизонтальной и вертикальной поляризацией в условиях штиля и бури на море в виде функций угла места, а также расчетные кривые, полученные по модели, в основе которой лежат законы физической оптики. Для углов места больше 10° влияние состояния моря оказывается минимальным. Соответствие между измеренными значениями коэффициентов и прогнозируемыми для гладкой плоской поверхности Земли, когда она модифицирована с помощью коэффициента дивергенции сферической Земли, возрастает по мере того, как состояние моря становится более спокойным.

РИСУНОК 3

Нормированная мощность многолучевой составляющей над океаном
в зависимости от угла места на частоте 1,6 ГГц



О : измерения при горизонтальной поляризации

Δ : измерения при вертикальной поляризации

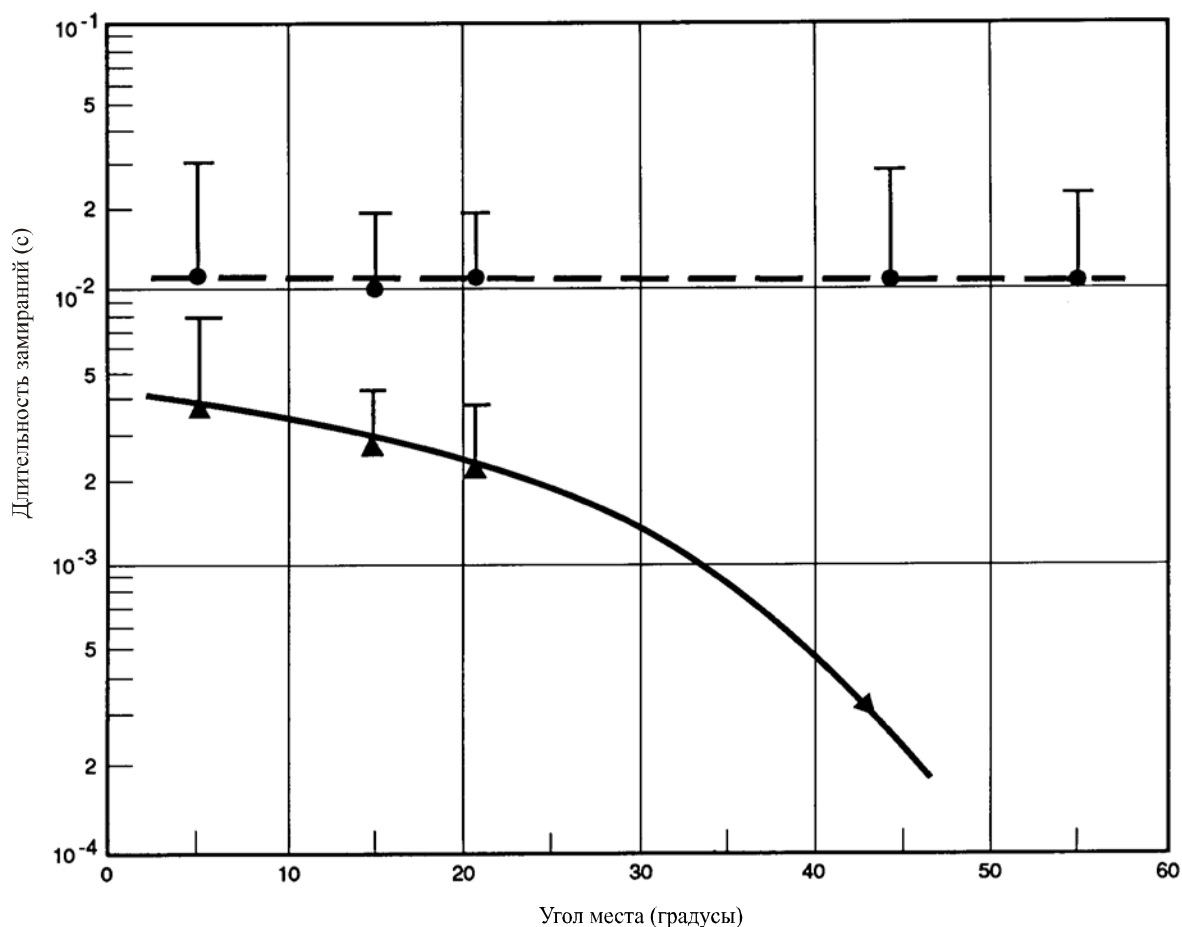
Кривые А : прогноз при горизонтальной поляризации, спокойное море
В : прогноз при горизонтальной поляризации, неспокойное море
С : прогноз при вертикальной поляризации, спокойное море
D : прогноз при вертикальной поляризации, неспокойное море

0682-03

Данные о многолучевом распространении были собраны в результате серии измерений на линиях связи воздушной подвижной спутниковой службы над Атлантическим океаном и некоторыми районами Европы. На рисунке 4 показаны среднее значение и стандартное отклонение длительности замираний на частоте 1,6 ГГц в зависимости от угла места при полете. (Для сбора данных использовалась антенна из скрещенных симметричных вибраторов с усилением 3,5 дБи. Воздушное судно совершало полет на номинальной высоте 10 км с номинальной путевой скоростью 700 км/час.)

РИСУНОК 4

Длительность замираний в зависимости от угла места при круговой поляризации
на частоте 1,6 ГГц (усиление антенны = 3,5 дБи); данные собирались
над Атлантическим океаном и Западной Европой



- : среднее при пороговом значении 0 дБ
 ▲ : среднее при пороговом значении -5 дБ
 T : среднее плюс стандартное отклонение

0682-04

4.4 Измерения явлений многолучевости при отражении от поверхности Земли

В таблице 2 представлены параметры многолучевости, измеренные во время полетов над землей; определения параметров такие же, как и в таблице 1. Многолучевые сигналы над землей характеризуются сильной изменчивостью. Зависимость от угла места не была установлена возможно потому, что поверхность земли также очень изменчива (данные собирались над влажной и сухой почвой, над болотами, сухим и мокрым снегом, льдом, озерами и т. д.).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Минимальный коэффициент ошибок; замиранья из-за многолучевости в канале подвижной связи приводят к такому минимальному коэффициенту ошибок, при котором увеличение мощности прямого сигнала не сопровождается уменьшением соответствующего коэффициента ошибок. Имитационное моделирование показало, что минимальный коэффициент ошибок выше для канала воздушной подвижной спутниковой связи, чем для канала сухопутной подвижной спутниковой связи.

ТАБЛИЦА 2

**Параметры многолучевого распространения
по данным измерений над землей**

Параметр	Диапазон измерений	Типичное значение
Нормированная мощность многолучевой составляющей (дБ) горизонтальная поляризация вертикальная поляризация	от –18 до 2 от –21 до –3	–9 –13
Разброс по задержке ⁽¹⁾ (мкс) по уровню 3 дБ по уровню 10 дБ	0,1–1,2 0,2–3	0,3 1,2
Ширина полосы корреляции ⁽²⁾ (кГц) по уровню 3 дБ	150–3 000	600
Допплеровское расширение ⁽¹⁾ (Гц) по уровню 3 дБ по уровню 10 дБ	20–140 40–500	60 200
Время декорреляции ⁽²⁾ (мс) по уровню 3 дБ	1–10	4

⁽¹⁾ Двустороннее значение.

⁽²⁾ Одностороннее значение.

4.5 Модель многолучевого распространения для воздушного судна во время захода на посадку над землей и во время посадки

Многолучевость с малой задержкой в условиях воздушной связи и для навигационных систем должна в особенности учитываться для широкополосных сигналов. Отражения от конструкции летательного аппарата создают значительные нарушения распространения. Отражения от земли и отражения от фюзеляжа вызывают явления распространения, особенно заметные на конечном этапе захода на посадку, когда готовность и надежность связи, а также точность и целостность навигации имеют особое значение.

Несмотря на то что данная модель в первую очередь предназначена для навигационных применений, она, безусловно, может использоваться с любым спутниковым сигналом. Вместе с тем, в силу ее первоначально планируемого применения, предполагается, что антенна располагается сверху кабины (где обычно размещается навигационная антенна). Полная модель предназначена для использования в качестве статистического имитатора. В силу того что значения ширины полосы отражений оказываются весьма низкими, процесс не обеспечит достаточной статистики в течение времени захода на посадку, составляющего 200 с. В целях имитирования статистически достоверной ошибки навигации модель следует применять для большого числа заходов на посадку. Определение минимальной, максимальной и средней ошибки навигации выполняется путем усреднения результатов имитирования этих заходов на посадку.

4.5.1 Физические воздействия

Причины возникновения многолучевости на принимающем сигнал воздушном судне подразделяются на две группы:

- конструкция воздушного судна; и
- отражение от земли.

Конструкция воздушного судна обуславливает существенные отражения только от фюзеляжа (когда антенна располагается сверху кабины). Такое отражение с весьма малой задержкой характеризуется незначительными колебаниями времени и доминируют в канале.

Высокого уровня отражения от крыльев (при расположении антенны сверху кабины) не наблюдалось.

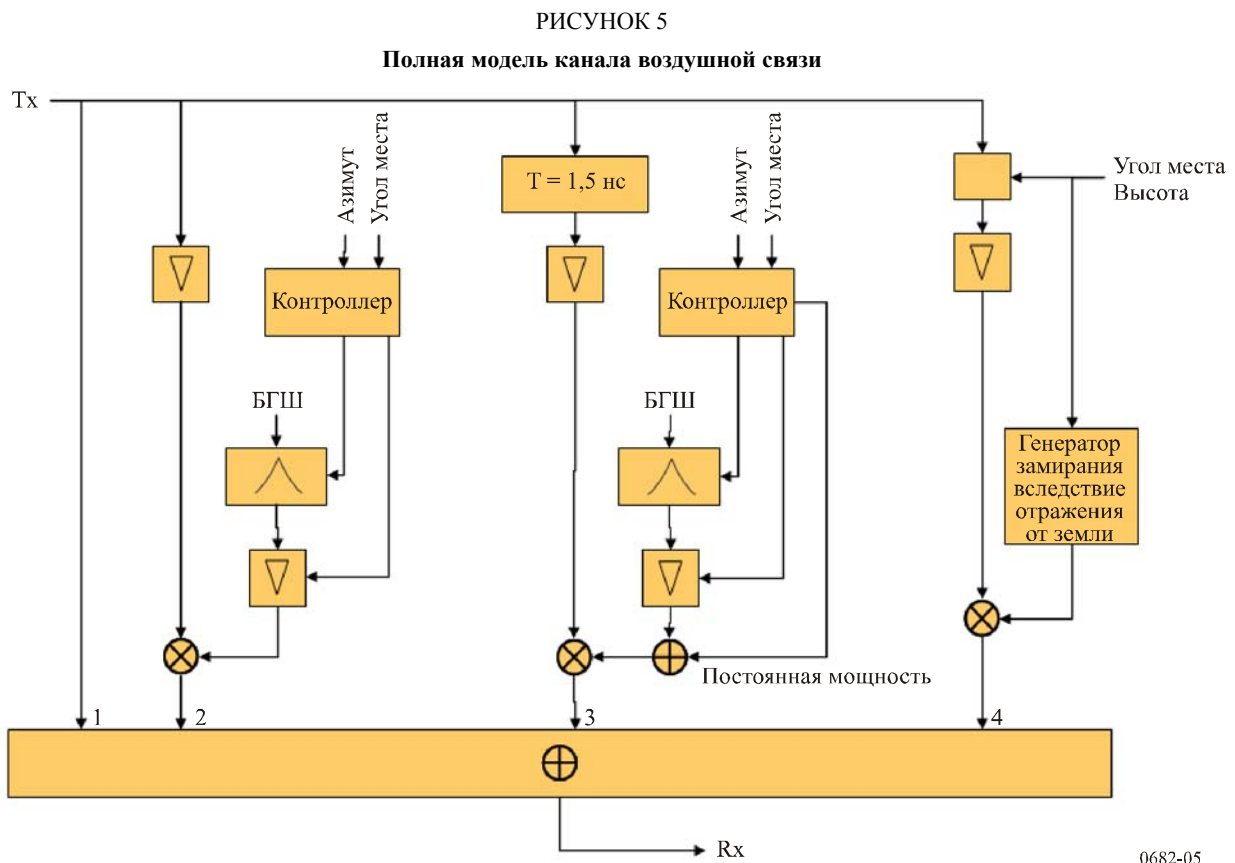
Отражение от земли характеризуется значительными колебаниями времени и доплеровским сдвигом в зависимости от скорости снижения воздушного судна.

4.5.2 Действительный диапазон модели

Модель может использоваться при частотах между 1 ГГц и 3 ГГц. Азимут спутника может изменяться в пределах 10° и 170° или 190° и 350° . Угол места на спутник может изменяться между 5° и 75° .

4.5.3 Модель

4.5.3.1 Общий обзор



На рисунке 5 показана полная модель канала воздушной связи для случая конечного этапа захода на посадку. Первая ветвь соответствует прямому сигналу (Ветвь 1), затем следует сегмент гладких замираний, имитирующий модуляцию по линии прямой видимости (Ветвь 2). Третью ветвь (Ветвь 3) образует процесс замирания вследствие многолучевости при отражении от фюзеляжа, задержка которого составляет 1,5 нс. Последняя ветвь (Ветвь 4) – это отражение от земли, задержка которого зависит от угла места и высоты.

Меняющимися по времени входными параметрами данной модели являются:

- азимут спутника, $\varphi(t)$;
- угол места спутника, $\theta(t)$;
- высота воздушного судна (над землей), $h(t)$, где t обозначает время.

Кроме того, для применения модели требуется знать геометрию воздушного судна и динамику полета. Эмпирические коэффициенты представлены для следующих типов воздушных судов:

- Vereinigte Flugzeugwerke VFW 614 (ATTAS), представляющий маленькое реактивное воздушное судно;
- Airbus A340, представляющий большое коммерческое реактивное воздушное судно.

Зависимость процессов вызываемого многолучевостью замирания от азимута и угла места, обозначенная на диаграмме, выше, как "контроллер", учитывает полиномиальную функцию, используемую в уравнении (10). Кроме того, задержка отражения от земли является функцией угла места и высоты, см. уравнение (15).

Блоки процессов замирания и зависящие от времени блоки имеют входные параметры для настройки модели на разные позиции спутника на орбите (угол места и азимут). Различные процессы замирания жестко зависят от типа воздушного судна.

ТАБЛИЦА 3
Параметры модели канала – Общий обзор

	Задержка (нс)	Относительная мощность (дБ)	Ширина полосы доплеровских частот (Гц)
LoS	0	0	0
Гладкое замирание	0	–14,2	< 0,1
Фюзеляж	1,5	–14,2	< 0,1
Земля	900–10 (снижение)	от –15 до –25	< 20 (сдвиг, вызванный скоростью снижения)

4.5.3.2 Прямая трасса

Кроме LoS (Ветвь 1), на этой трассе действует сильная модуляция (Ветвь 2), имеющая райсовское распределение амплитуды. Этот процесс замирания генерируется согласно уравнениям (8), (9), (10) и (11).

4.5.3.3 Отражение от крыльев

Если антенна расположена сверху кабины (что является обязательным для спутниковых навигационных антенн), входящий луч рассеивается в пределах большого углового диапазона. Следовательно, общее значение мощности отражения от крыльев пренебрежимо мало (ниже –35 дБ).

Для антенн, имеющих иное расположение (например, для систем связи), особенно между крыльями, следует учитывать составляющую отражения от крыльев.

4.5.3.4 Отражение от фюзеляжа

Для генерации временной последовательности отражения от фюзеляжа важно знать его спектр. Работу модели определяет стохастический процесс p_{proc} . Этот процесс может генерироваться путем фильтрации комплексного белого шума спектром, определяемым уравнением (8), где b_2 и b_3 – коэффициенты экспоненциального процесса:

$$p_{proc}(\text{дБ}) = b_1 + b_2 \cdot e^{b_3 \cdot |f|}. \quad (8)$$

Кроме этого процесса с шумами, данный сигнал включает среднее значение составляющей постоянного тока (DC), *mean*.

Полная мощность этого процесса составила согласно измерениям –14,2 дБ, что определяет величину постоянной

$$b_1 = 14,2 - mean \quad (\text{дБ}). \quad (9)$$

Как отмечалось ранее, действительный диапазон углов места трассы находится между 5° и 75° . Азимут может изменяться от 15° до 165° и от 195° до 335° , соответственно.

Для вывода среднего $mean$ и коэффициентов b_2 и b_3 к каждому параметру ($mean$, b_2 , b_3) применяется двумерная полиномиальная функция 4-го порядка. Например,

$$mean(\theta, \varphi) = [\theta^4 \ \theta^3 \ \theta^2 \ \theta \ 1] \cdot A_{mean} \cdot \begin{bmatrix} \varphi^4 \\ \varphi^3 \\ \varphi^2 \\ \varphi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

дает значение среднего как функции угла места θ и азимута φ , где A_{mean} является матрицей 5×5 полиномиальных коэффициентов. Аналогично рассчитываются коэффициенты b_2 и b_3 .

Для двух примеров воздушных судов (ATTAS и A340) эти матрицы имеют, соответственно, следующий вид:

$$A_{mean, ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -2,0057e-12 & 5,0499e-10 & -4,6114e-8 & 1,8053e-6 & -2,4773e-5 \\ 2,8598e-10 & -7,4259e-8 & 7,0553e-6 & -2,9116e-4 & 0,0043 \\ -1,1568e-8 & 3,2474e-6 & -3,3846e-4 & 0,0156 & -0,2698 \\ 3,8681e-8 & -2,2536e-5 & 0,0038 & -0,2512 & 6,3140 \\ 1,9434e-6 & -3,5747e-4 & 0,0133 & 0,8133 & -28,1329 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3, ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -1,8398e-12 & 4,2182e-10 & -3,3813e-8 & 1,0855e-6 & -1,0875e-5 \\ 2,6665e-10 & -6,0897e-8 & 4,8490e-8 & -1,5346e-4 & 0,0015 \\ -1,2870e-8 & 2,9171e-6 & -2,2947e-4 & 0,0071 & -0,0629 \\ 2,3542e-7 & -5,2520e-5 & 0,0040 & -0,1193 & 0,9153 \\ 1,2058e-6 & 2,5797e-4 & -0,0187 & 0,5027 & -4,1128 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2, ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -3,9148e-11 & 8,8672e-9 & -7,0048e-7 & 2,2069e-5 & -2,1492e-4 \\ 6,0699e-9 & -1,3708e-6 & 1,0784e-4 & -0,0034 & 0,0322 \\ -3,2203e-7 & 7,2344e-5 & -0,0057 & 0,1747 & -1,6206 \\ 6,7649e-6 & -0,0015 & 0,1162 & -3,5328 & 31,6814 \\ -4,4741e-5 & 0,0098 & -0,7383 & 21,9981 & -142,3524 \end{bmatrix}$$

(11)

$$A_{means, A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -2,6220e-12 & 6,0886e-10 & -5,0686e-8 & 1,8074e-6 & -2,3633e-5 \\ 4,3848e-10 & -1,0231e-7 & 8,6113e-6 & -3,1465e-4 & 0,0044 \\ -2,3577e-8 & 5,5538e-6 & -4,7815e-4 & 0,0184 & -0,2872 \\ 3,9552e-7 & -9,2657e-5 & 0,0082 & -0,3431 & 6,9937 \\ -1,5225e-6 & 3,3690e-4 & -0,0312 & 1,7110 & -32,8066 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3, A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -1,2021e-12 & 2,7780e-10 & -2,2626e-8 & 7,4413e-7 & -7,5120e-6 \\ 1,7647e-10 & -4,0725e-8 & 3,3131e-6 & -1,0855e-4 & 0,0011 \\ -8,6470e-9 & 1,9871e-6 & -1,6099e-4 & 0,0052 & -0,0488 \\ 1,6123e-7 & -3,6656e-5 & 0,0029 & -0,0946 & 0,8204 \\ -8,5647e-7 & 1,8942e-4 & -0,0149 & 0,4826 & -5,5011 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2, A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -3,1880e-11 & 7,2724e-9 & -5,8454e-7 & 1,9069e-5 & -1,9707e-4 \\ 4,7229e-9 & -1,0775e-6 & 8,6761e-5 & -0,0028 & 0,0293 \\ -2,3471e-7 & 5,3437e-5 & -0,0043 & 0,1413 & -1,4541 \\ 4,4756e-6 & -0,0010 & 0,0812 & -2,6731 & 27,5448 \\ -2,5361e-5 & 0,0056 & -0,4459 & 14,8917 & -109,1083 \end{bmatrix}$$

4.5.3.5 Отражение от земли

Отражение от земли имеет доплеровский сдвиг, обусловливаемый скоростью снижения воздушного судна (вертикальная скорость), $v_{vert}(t)$. Этот доплеровский сдвиг определяется уравнением:

$$f_{ground}(t) = \frac{v_{vert}(t)}{\lambda}, \quad (12)$$

где λ обозначает длину волны. Вокруг среднего значения частоты, определяемой уравнением (12), хорошее представление доплеровского спектра отражения от земли дает нормированное гауссово распределение:

$$P_{Gr(дБ)} = P_{g(дБ)} + 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}} \right). \quad (13)$$

P_g обозначает мощность отражения от земли, получаемую по марковской модели, где значение девиации было определено экспериментальным путем, равным:

$$\sigma = 2,92 \text{ Гц}. \quad (14)$$

Для моделирования отражения от земли конечный этап захода на посадку подразделяется на три разные зоны высоты (большая, средняя и малая). В каждой зоне отражение от земли характеризуется марковской моделью состояния.

ТАБЛИЦА 4
Области высоты для марковской модели состояния

Уровень	От (м)	До (м)
"Высокий"	1 000	400
"Средний"	400	100
"Низкий"	100	0

РИСУНОК 6
Области высоты модели отражения от земли

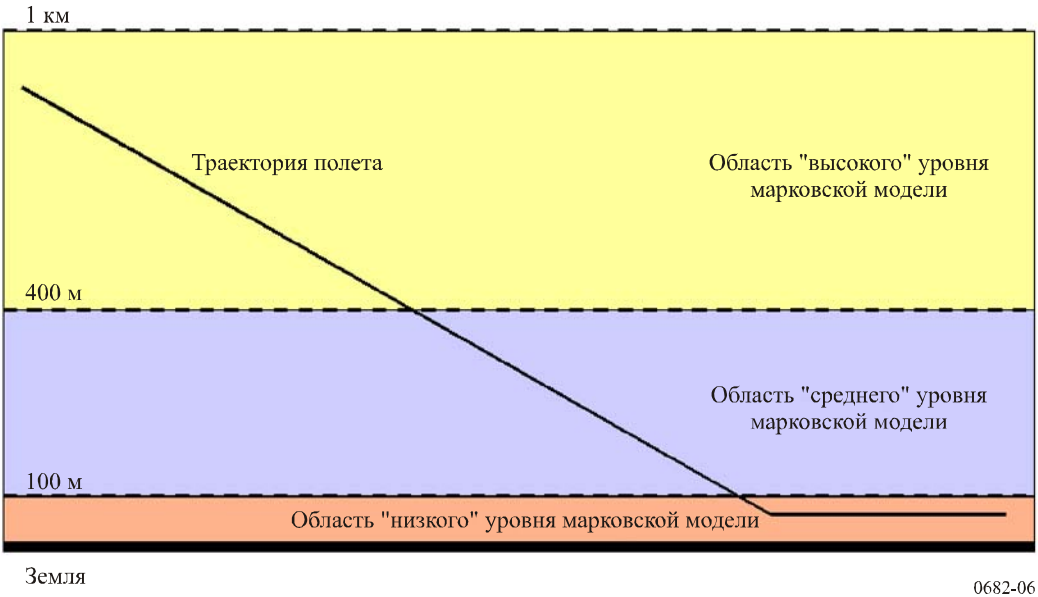


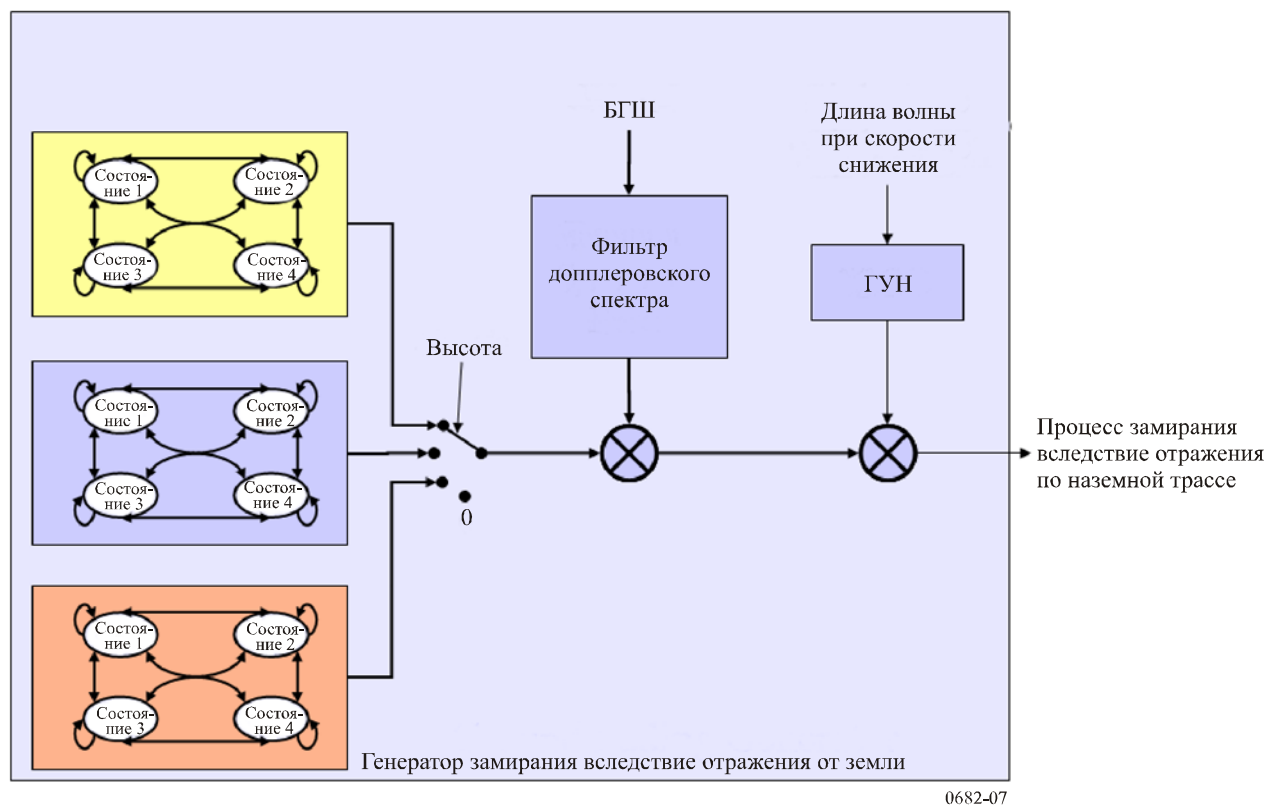
ТАБЛИЦА 5
Состояния марковской модели замирания
вследствие отражения от земли

Состояние	Мощность (дБ)
1	–15
2	–19
3	–23
4 ⁽¹⁾	< –25

⁽¹⁾ Отражение от земли отсутствует.

РИСУНОК 7

Реализация модуля генератора замирания вследствие отражения от земли



Марковские вероятности перехода определяются по квантованным данным измерений. Матрица P вероятностей перехода, где $P_{x,y}$ – вероятность изменения состояния x на состояние y , определяется для каждой области высоты независимо.

Процесс замирания вследствие отражения от земли генерируется с помощью марковской модели, зависимой от высоты, при частоте выборки 25,4 Гц. Следует заметить, что эти вероятности перехода действительны только для указанной частоты. Значения высоты, соответствующие переходам, приведены в таблице 4 и показаны на рисунке 6.

Состояния мощности на выходе модели приведены в таблице 5 и показаны на рисунке 7.

По результатам измерений была получена следующая матрица вероятностей перехода:

$$\begin{aligned}
 P_{400-1500} &= \begin{bmatrix} 0,9866 & 0,0087 & 0,0047 & 0 \\ 0,6087 & 0,3043 & 0,0870 & 0 \\ 0,2143 & 0,3571 & 0,4286 & 0 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3334 & 0 \end{bmatrix} \\
 P_{100-400} &= \begin{bmatrix} 0,9842 & 0,0130 & 0,0028 & 0 \\ 0,6667 & 0,2222 & 0,0889 & 0,0222 \\ 0,0667 & 0,1167 & 0,5000 & 0,3166 \\ 0 & 0 & 0,3279 & 0,6721 \end{bmatrix} \\
 P_{10-100} &= \begin{bmatrix} 0,9645 & 0,0310 & 0,0045 & 0 \\ 0,7308 & 0,1538 & 0,1154 & 0 \\ 0,6250 & 0,1250 & 0,2500 & 0 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3334 & 0 \end{bmatrix} \\
 P_{0-10} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где P_{x-y} означает вероятность перехода в области высоты $h(t) \geq x$ и $h(t) < y$.

Следует отметить, что данная марковская модель описывает посадку в аэропорту Грац в Австрии. В этой местности преобладают леса, пастбища, улицы встречаются редко. На характеристики отражения от земли могут влиять погодные условия, окружающая местность, геометрия полета и многие другие параметры. Поэтому эти значения следует рассматривать как параметры, которые пользователь должен адаптировать в случае применения для других типов местности. В частности, динамика захода на посадку над водой (соленой) или над областью расположения большого числа каналов, вероятно, будет иной.

Задержка отражения от земли как функция угла места трассы может легко рассчитываться, если принять, что местность вокруг аэропорта плоская:

$$\tau_{ground}(t) = \frac{2 \cdot h(t) \cdot \sin(\theta)}{c}, \tag{16}$$

где c – скорость света.

4.5.4 Загрузка модели

Возможна бесплатная загрузка модели, реализованной с помощью Matlab, с сайта по адресу: <http://www.kn-s.dlr.de/satnav/Aeronautical.html>.