

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R F.1765

Методика определения совокупной эквивалентной изотропно-излучаемой мощности, создаваемой применениями высокой плотности в фиксированной службе при связи пункта с пунктом, работающих в диапазонах частот выше 30 ГГц

(2006)

Сфера применения

В данной Рекомендации представлены методики, которые могут быть применены для определения совокупной эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (с.э.и.и.м.) передающих станций применений высокой плотности в фиксированной службе (ВП-ФС) при связи пункта с пунктом (П-П) в диапазонах частот выше 30 ГГц, и которые могут быть использованы администрациями, желающими оценить возможные помехи, создаваемые станциями П-П ВП-ФС другим службам, подверженным помехам.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что администрациям возможно потребуется расчет совокупной эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (с.э.и.и.м.) при развертывании передающих станций применений высокой плотности в фиксированной службе при связи пункта с пунктом (П-П ВП-ФС) по отношению к центральному пункту для оценки возможных помех другим подверженным помехам службам от станций П-П ВП-ФС на национальной и двусторонней основе;
- b) что использование автоматического регулирования мощности передатчика (АРМП) в П-П передатчиках могло бы уменьшить совокупную излучаемую мощность;
- c) что также необходимо определить с.э.и.и.м. как функцию от угла места, подлежащую оценке с учетом модели (2) механизмов распространения радиоволн;

признавая,

1 что в п. 5.547 Регламента радиосвязи (РР) определяется, что полосы частот 31,8–33,4 ГГц, 37–40 ГГц, 40,5–43,5 ГГц, 51,4–52,6 ГГц, 55,78–59 ГГц и 64–66 ГГц могут использоваться для применений высокой плотности в фиксированной службе (ВП-ФС),

отмечая,

- a) что в Резолюции 75 (ВКР-2000) МСЭ-R предлагается в срочном порядке разработать техническую основу для определения координационной зоны с целью координации приемной земной станции службы космических исследований (дальний космос) с передающими станциями ВП-ФС в полосах частот 31,8–32,3 ГГц и 37–38 ГГц;
- b) что в Резолюции 79 (ВКР-2000) МСЭ-R предлагается провести исследования по определению координационного расстояния между радиоастрономическими станциями, работающими в полосе частот 42,5–43,5 МГц, и системами ВП-ФС,

рекомендует,

1 чтобы следующие математические модели могли быть временно использованы для получения с.э.и.и.м. передающих станций П-П ВП-ФС, при допущении, что углы места всех передающих антенн ВП-ФС равны 0° (см. Примечания 1, 2, 3, 5, 6 и 9):

1.1 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 0° :

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t + 1,061 (\log N_t)^2 + (-0,1164 G_t + 6,103) \\ & \log N_t + 0,9428 G_t - 2,62 \text{ дБВт}, \end{aligned}$$

1.2 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен $2,5^\circ$:

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t - 0,13743 (\log N_t)^3 + 1,8243 (\log N_t)^2 + 1,5569 \log N_t + 0,0052917 G_t^3 \\ & - 0,57530 G_t^2 + 19,985 G_t - 200,77 \text{ дБВт}, \end{aligned}$$

1.3 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 5° :

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t + 0,54858 (\log N_t)^2 + 5,6488 \log N_t - 0,0036218 G_t^3 + 0,42380 G_t^2 \\ & - 16,645 G_t + 227,44 \text{ дБВт}, \end{aligned}$$

1.4 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 10° :

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_t + 9,086 \log N_t - 0,25 G_t + 8,30 \text{ дБВт},$$

1.5 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 15° :

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_t + 9,344 \log N_t - 0,25 G_t + 5,19 \text{ дБВт},$$

1.6 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 20° :

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_t + 9,522 \log N_t - 0,25 G_t + 3,19 \text{ дБВт},$$

1.7 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 25° :

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_t + 9,663 \log N_t - 0,25 G_t + 1,78 \text{ дБВт},$$

1.8 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 30° :

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_t + 9,775 \log N_t - 0,25 G_t + 0,74 \text{ дБВт},$$

где:

P_t : мощность передатчика на входе антенны (дБВт);

N_t : количество передатчиков;

G_t : усиление антенны (дБи);

2 чтобы следующие математические модели могли быть временно использованы для получения с.э.и.и.м. передающих станций П-П ВП-ФС, при допущении, что у передающих антенн ВП-ФС имеются различные углы места, как они описаны в Приложении 1 (см. Примечания 1, 2, 4, 5, 6, 8 и 9):

2.1 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 0° :

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t + 0,82096 (\log N_t)^3 + (-0,15210 G_t - 0,92771) (\log N_t)^2 + (0,024504 G_t^2 \\ & - 1,0198 G_t + 27,270) \log N_t - 0,077296 G_t^2 + 5,1982 G_t - 73,62 \text{ дБВт}, \end{aligned}$$

2.2 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен $2,5^\circ$:

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t + 0,93906 (\log N_t)^3 + (-0,31918 G_t + 3,4110) (\log N_t)^2 + (0,023524 G_t^2 + \\ & 0,096937 G_t - 4,8156) \log N_t + 0,0011791 G_t^3 - 0,21452 G_t^2 + \\ & 8,5619 G_t - 82,88 \text{ дБВт}, \end{aligned}$$

2.3 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 5° :

$$с.э.и.и.м. = P_t + (-0,10457 G_t + 3,0618) (\log N_t)^3 + (0,027889 G_t^2 - 1,1358 G_t + 9,7775) (\log N_t)^2 + (-0,15803 G_t^2 + 9,3247 G_t - 132,36) \log N_t + 0,20619 G_t^2 - 13,901 G_t + 247,30 \text{ дБВт},$$

2.4 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 10° :

$$с.э.и.и.м. = P_t + 9,263 \log N_t - 0,2511 G_t + 8,43 \text{ дБВт},$$

2.5 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 15° :

$$с.э.и.и.м. = P_t + 9,299 \log N_t - 0,25 G_t + 5,45 \text{ дБВт},$$

2.6 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 20° :

$$с.э.и.и.м. = P_t + 9,497 \log N_t - 0,25 G_t + 3,32 \text{ дБВт},$$

2.7 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 25° :

$$с.э.и.и.м. = P_t + 9,651 \log N_t - 0,25 G_t + 1,84 \text{ дБВт},$$

2.8 когда угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м., равен 30° :

$$с.э.и.и.м. = P_t + 9,767 \log N_t - 0,25 G_t + 0,79 \text{ дБВт};$$

3 что при другом угле места для направления, в котором вычисляется э.и.и.м., для которого формула расчета с.э.и.и.м. не приведена в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*, э.и.и.м. следует определять посредством интерполяции;

4 что расстояние до станции, подверженной помехе, следует измерять, как правило, от центра зоны развертывания ВП-ФС (см. Примечание 7).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В Приложении 1 описан метод определения значений с.э.и.и.м., приведенных в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*. Значения с.э.и.и.м., соответствующие 0 или малым углам места для направлений, в которых проводятся вычисления, подходят для оценки влияния помех при использовании модели (1) механизмов распространения радиоволн, в то время как значения, соответствующие большим углам места для направлений, в которых проводятся вычисления, подходят для оценки влияния помех при использовании модели (2) механизмов распространения радиоволн.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Формулы, приведенные в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*, были получены путем аппроксимации для $G_t = 28\text{--}46$ дБи и $N_t = 32\text{--}8192$. Вероятность того, что с.э.и.и.м. превысит значения, указанные в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*, составляет 5% (т. е. доверительная вероятность расчетов составляет 95%). Максимальная погрешность аппроксимаций обычно составляет порядка 0,5 дБ, а в некоторых случаях, при использовании сложных формул аппроксимации с многочленами третьего порядка от G или $\log N_b$, около 1 дБ. Определение наиболее подходящей доверительной вероятности требует дальнейшего исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Формулы, приведенные в п. 1 раздела *рекомендует*, основаны на допущении, что азимутальные углы антенн ВП-ФС равномерно распределены в пределах от 0° до 360° и их углы места равны нулю.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Формулы, приведенные в п. 2 раздела *рекомендует*, основаны на допущении, что азимутальные углы антенн ВП-ФС равномерно распределены в пределах от 0° до 360° и их углы места изменяются как описано в § 2.3 Приложения 1. Определение наиболее приемлемой функции распределения углов места антенн ВП-ФС, которая будет применима в каждом диапазоне частот, требует дальнейшего исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Формулы, приведенные в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*, могут переоценить значения реальной с.э.и.и.м., так как при расчете не учитываются возможные потери вследствие отражений. Определение значимости этого фактора требует дальнейшего исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – Для систем ВП-ФС, использующих АРМП, показатель P_t в формуле из пп. 1 и 2 раздела *рекомендует* обозначает мощность передатчика в нормальных условиях при отсутствии осадков. Вообще говоря, помеха затрагиваемой станции будет значительно меньше при наличии осадков.

ПРИМЕЧАНИЕ 7. – В общем случае расстояние, определенное в п. 4 раздела *рекомендует*, будет приемлемым для определения с.э.и.и.м. при условии, что расстояние между подверженным помехам приемником и зоной развертывания ВП-ФС не слишком мало по сравнению с радиусом зоны развертывания ВП-ФС (см. § 1.3 Приложения 1).

ПРИМЕЧАНИЕ 8. – В Рекомендации МСЭ-R F.1498 приведены другие распределения углов места антенн ВП-ФС, работающих в диапазоне 37–40 ГГц. Чтобы охватить такие распределения в рамках настоящей Рекомендации требуется дальнейшее исследование.

ПРИМЕЧАНИЕ 9. – Для облегчения внедрения компьютерных вычислений в соответствии с данной Рекомендацией аппроксимирующая формула, приведенная в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*, представлена в табличной форме в Дополнении 1 к Приложению 1.

Приложение 1

Методика определения совокупной мощности помех, создаваемых П-П ВП-ФС

1 Метод моделирования

1.1 Введение

В Резолюции 75 (ВКР-2000) предлагается разработать техническую основу для определения координационной зоны с целью координации между приемными земными станциями службы космических исследований (дальний космос) и передающими станциями применений высокой плотности в фиксированной службе (ВП-ФС) в полосах частот 31,8–32,3 ГГц и 37–38 ГГц. Кроме того, в Резолюции 79 (ВКР-2000) МСЭ-R предложено провести исследования по определению координационного расстояния между радиоастрономическими станциями, работающими в полосе частот 42,5–43,5 МГц, и системами ВП-ФС.

В данной Рекомендации представлены методики, которые могут быть использованы для расчета с.э.и.и.м. передающих станций П-П ВП-ФС, которые могут быть применены администрациями, желающими оценить возможные помехи, создаваемые станциями П-П ВП-ФС другим службам, подверженным помехам, при обсуждении на национальном и двустороннем уровне. Методики, приведенные в данной Рекомендации, могут быть использованы администрациями, желающими ответить на раздел *решает* в Резолюциях 75 (ВКР-2000) и 79 (ВКР-2000), в качестве основы для дальнейшего исследования.

Для разработки математической модели, которая позволяет оценить эквивалентную совокупную мощность помех, излучаемых П-П сетями ВП-ФС, было применено моделирование таких сетей, используя в качестве примера диапазон частот 38 ГГц. Однако результаты расчета не зависят от частоты. Совокупная мощность выражается в параметрах числа передатчиков, усиления антенн и уровнях мощности передатчиков и суммируется (логарифмически) по более низкому показателю, чем $10 \log N$, где N – количество передатчиков.

В данном разделе приведена методика определения совокупной излучаемой мощности от распределения П-П ВП-ФС с использованием компьютерного моделирования.

Для определения совокупной излучаемой мощности, эквивалентной мощности одного передатчика, расположенного на краю сети ближе всех к приемнику станции, подверженному помехам, П-П передатчики ВП-ФС были промоделированы путем варьирования количеством передатчиков, усилением антенн, углами места и азимута антенн. В данном случае, общая излучаемая мощность определяется в параметрах совокупной эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (с.э.и.и.м.). Для данного моделирования это сумма мощностей излучения от сети передатчиков, распределенных по территории, принимаемая в пункте, расположенном на некотором расстоянии, и скорректированная с учетом потерь в свободном пространстве между этим пунктом и ближайшим передатчиком, т. е.:

$$с.э.и.и.м. = \sum_{\text{все направления}} P_{\text{принимаемая}} + L_{fs} \quad \text{дБВт}^*, \quad (1)$$

где

L_{fs} : потери в свободном пространстве.

1.2 Параметры системы

Было проведено масштабное исследование систем П-П ВП-ФС, включая Рекомендацию МСЭ-R F.758, документацию, представленную в МСЭ-R, и другие источники, на основании которых был получен обобщенный ряд параметров систем, которые были использованы при моделировании.

В качестве входных параметров модели были рассмотрены три коэффициента усиления антенн 28, 36 и 44 дБи. Для определения диаграммы направленности излучения типовой антенны была взята Рекомендация МСЭ-R F.1245. В имитационной модели была принята мощность передатчика 20 дБВт, но абсолютное значение мощности не так важно. В расчете также не учитывалось влияние поляризации.

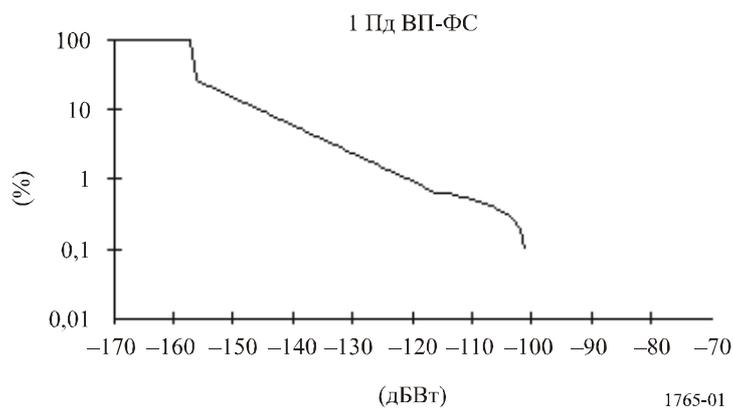
Для того, чтобы суммировать сигналы от всех П-П передатчиков, контрольные принимающие станции с изотропными антеннами с усилением 0 дБи были расположены на расстоянии 50, 100 и 150 км от края сети.

1.3 Аналитическое моделирование

Моделирование проведено с различным числом передатчиков, антенны которых вращались по азимуту со случайной скоростью сканирования в пределах между 0 и 1 градус/с, в то время как начальный азимут также выбирался случайным между 0° и 360°. Путем выборки совокупной мощности в течение определенного периода времени были получены распределения, описывающие вероятность того, что антенны наведены в заданном направлении, и с помощью которых в дальнейшем, можно дать оценку наихудшего случая уровней мощности при определенной степени риска. Исследование уровней мощности, полученных на трех приемниках, находящихся на расстоянии 50, 100 и 150 км от края сети, выявило малые различия после проведения корректировки, учитывающие потери в свободном пространстве. Контрольные приемники располагались только в одном направлении от сети, так как круговая симметрия была достигнута путем вращения в азимутальном направлении всех передающих антенн. Передатчики были равномерно распределены по окружности диаметром 25 км и некоторые варианты моделирования повторялись с передатчиками, распределенными по круговым зонам диаметром 15 и 25 км. На рисунке 1 показана интегральная функция распределения уровней мощности от одного передатчика с усилением антенны 44 дБи и углом места антенны, равным 0°, и, как и ожидалось, он четко отображает диаграмму направленности излучения антенны.

* Мощность, принимаемая изотропной антенной (усиление антенны 0 дБи).

РИСУНОК 1

Интегральная функция распределения мощности от одной случайно расположенной антенны

С подключением большего количества антенн распределение вероятности изменяется. На рисунке 2 представлено распределение от 12 случайно вращающихся антенн. На рисунке 2 показано, что формируются два распределения: мощность от главного лепестка одной антенны объединяется с мощностью от боковых лепестков других антенн в сети и достигает уровня мощности порядка -90 дБВт (эквивалентно около 68 дБВт при поправке на потери в свободном пространстве), в то время как более ассиметричное распределение формируется боковыми лепестками всех антенн на более низких уровнях мощности. При увеличении количества передатчиков этот нижний пик от боковых лепестков антенны увеличивается по абсолютному значению до тех пор, пока он окончательно не поглотит пик от главного лепестка, и распределение достигнет логарифмически нормального распределения, как показано в примерах на рисунке 3.

РИСУНОК 2

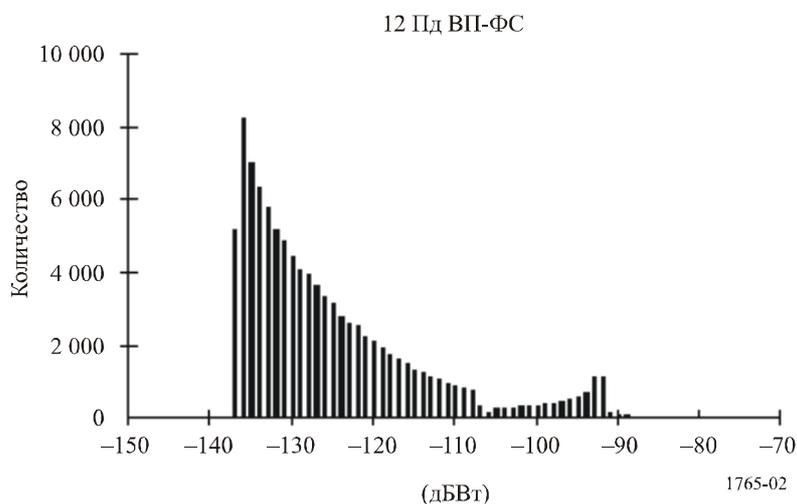
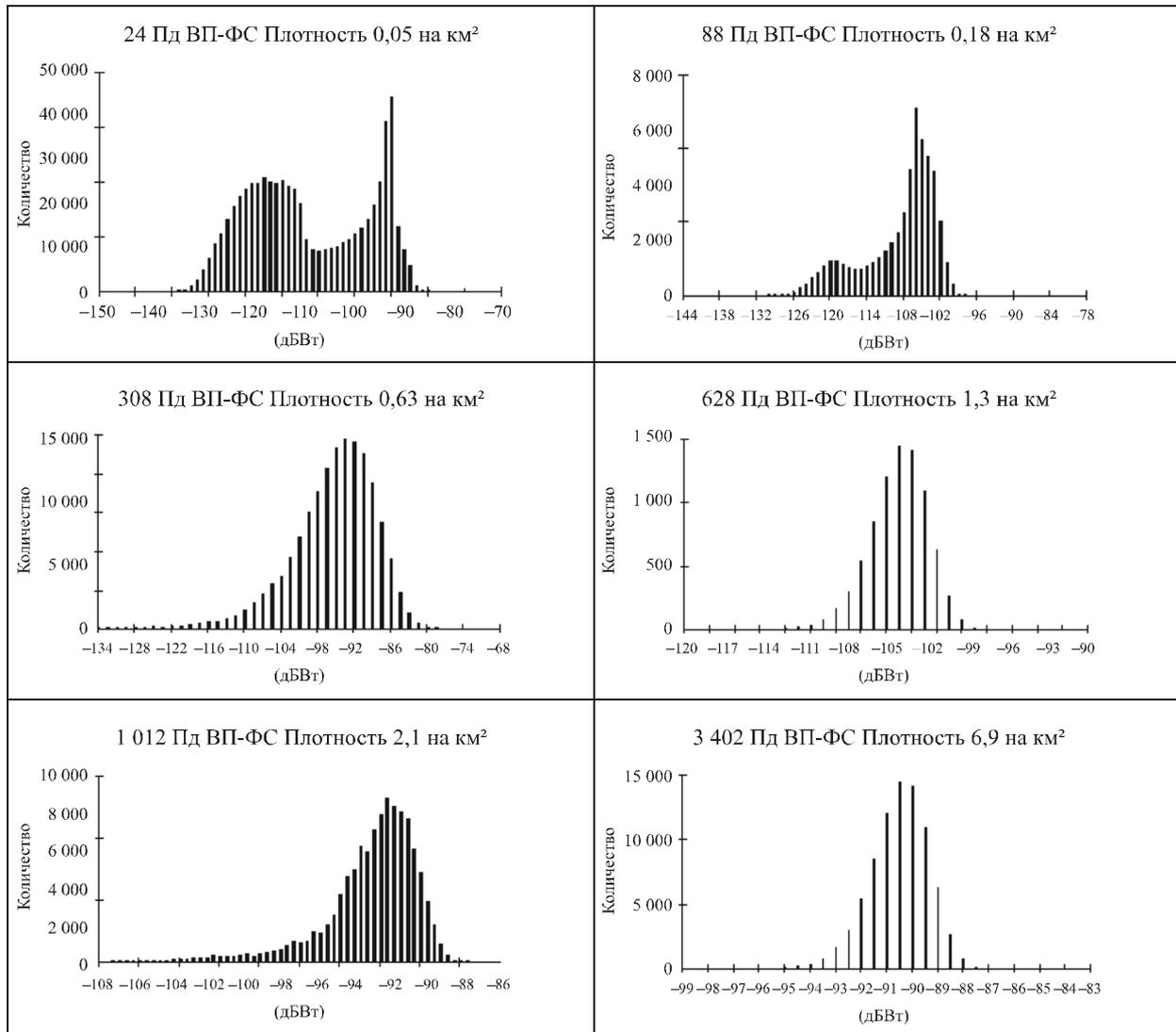
Распределение уровней мощности от 12 случайно расположенных антенн

РИСУНОК 3

Примеры распределений уровней мощности при увеличении количества П-П передатчиков



1765-03

Варьируемое количество передатчиков было распределено в виде равномерной сетки, вписанной в зоны в форме круга диаметром 25 км, и моделирование было повторено для зон диаметром 15 км и 35 км.

Для того чтобы получить оценку вероятных уровней совокупной мощности при расчете помех, целесообразно рассмотреть наихудшие случаи значений помех, полученные при моделировании, которые с поправкой на потери в свободном пространстве, эквивалентны наихудшему случаю совокупной излучаемой мощности от сети передатчиков. Так как величина этих распределений продолжает увеличиваться в процессе моделирования, то также возрастает уровень наихудшего случая для мощности помех, и была проведена обширная серия испытаний в объеме, при котором значение наихудшего случая продолжало расти с увеличением времени моделирования. После первоначального резкого роста было обнаружено замедление темпов роста. Моделирование проводилось шагами в 1 с и 1 мин., и после определенного количества таких повторов, стало понятно, что разницы между ними практически нет. Чем все большее количество передатчиков добавлялось при моделировании, тем значительно снижалась скорость моделирования. Все моделирование, использованное при анализе, проводилось со скоростью 100 000 шагов в 1 минуту для уверенности в том, что результаты отражают сопоставимые риски.

1.4 Влияние углов места антенн ВП-ФС

В предыдущем разделе было сделано допущение, что все углы места антенн ВП-ФС равны 0° . Однако, с.э.и.и.м. может изменяться в диапазоне изменения углов места антенн ВП-ФС. Поэтому был проведен анализ распределения углов места для 8539 фиксированных линий в Великобритании, работающих в диапазоне частот 38 ГГц. Это дало распределение передатчиков в четырех интервалах значений углов места, как показано в таблице 1, и дальнейшее моделирование проводилось с четырьмя группами передатчиков, разбитыми в той же пропорции, всего 1950 передатчиков. В каждой такой группе угол места антенны выбирался случайно в пределах интервалов, приведенных в таблице 1.

Моделирование проводилось для двух случаев: когда углы места выбирались случайно в пределах интервалов, приведенных в таблице 1, и когда все углы места равнялись нулю. Сравнение результатов показано в таблице 2, в которой приведена рассчитанная совокупная излучаемая мощность.

РИСУНОК 4

Распределение углов места для линий 38 ГГц в Великобритании
(Внимание: логарифмическая шкала по вертикальной оси)

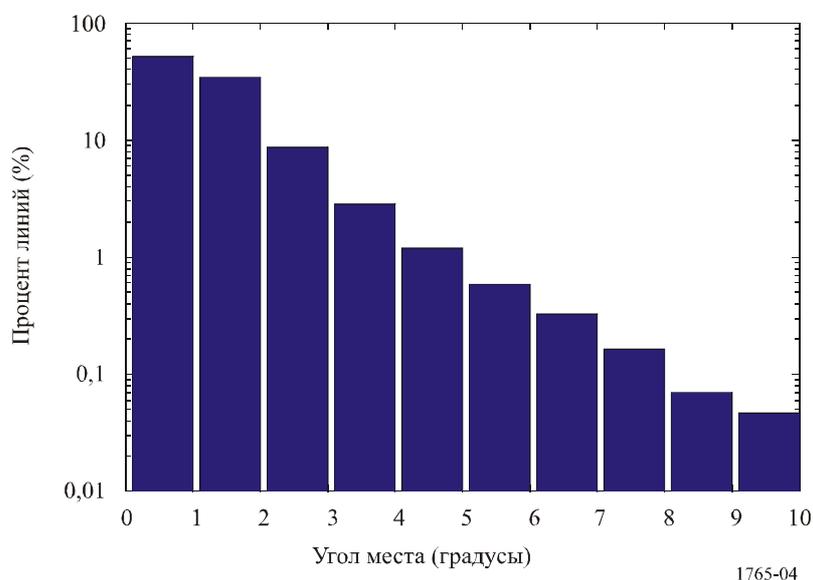


ТАБЛИЦА 1

Распределение углов места антенн

Интервалы углов места (градусы)	Процент 38 ГГц линий из рисунка 4	Количество передатчиков в каждой группе моделирования
0–1	51,7	1 012
1–2	34,4	665
2–5	12,7	249
5–10	1,2	24

ТАБЛИЦА 2

Усиление антенны (дБи)	с.э.и.и.м. (дБВт)		Разница (дБ)
	При различных углах места	При угле места, равном 0°	
28	64,9	65,4	0,5
36	68,9	70,1	1,2
44	73,3	75,2	1,9

Для рассмотренного реального распределения углов места нет значительной разницы между результатами. Однако следует заметить, что в таблице 2 рассмотрен случай, при котором оценивалась только с.э.и.и.м. в направлении горизонта (0°). В разделе 2 рассматриваются случаи для с.э.и.и.м. в направлении, где углы места более 0°. В этих случаях разница между ситуацией, когда угол места является переменным и когда угол места равен 0°, может быть значительной в зависимости от усиления антенн ВП-ФС.

Результаты, приведенные выше, были получены для сетей П-П ВП-ФС передатчиков, распределенных в круговой зоне диаметром 25 км. Для того чтобы изучить зависимость от плотности линий, моделирование повторялось для зон диаметром 15 и 35 км.

Полученная разница в совокупной излучаемой мощности для случаев, когда передатчики распределены по разным зонам, весьма незначительна, по крайней мере, между зонами диаметром 15 км и 35 км. Уровни мощности достаточно независимы от зоны, где распределены передатчики, – в пределах ±0,5 дБ. Поэтому нет необходимости включать конкретную зону в качестве параметра в модели для с.э.и.и.м. от передатчиков П-П ВП-ФС.

2 Теоретические расчеты методом интеграла свертки

2.1 Общий метод для анализа и расчетов доверительной вероятности

В предыдущем разделе был описан метод моделирования для расчета с.э.и.и.м. от ряда передатчиков ВП-ФС. Однако следует отметить, что, в общем случае, метод моделирования требует больших затрат времени для достижения надежных результатов, и поэтому его использования следует избегать, если доступны другие методы и величину погрешности расчета, содержащуюся в результатах, невозможно достаточно точно вычислить, в особенности для малого процента, для которого полученные значения могут быть превышены.

Фактически, данный вопрос является проблемой сугубо математического характера, когда должна быть исследована плотность распределения вероятности (*pdf*) совокупной излучаемой мощности от ряда передатчиков ВП-ФС. Согласно теории точная *pdf* может быть аналитически получена следующим образом:

Допустим, что $p(N_i, x)$ – это *pdf* совокупной излучаемой мощности, x (в численном выражении), от N_i передатчиков, тогда *pdf* для с.э.и.и.м. от $M_i + N_i$ передатчиков может быть вычислена посредством интеграла свертки следующим образом:

$$p(M_i + N_i, x) = \int_0^x p(M_i, u) \cdot p(N_i, x - u) \cdot du. \quad (2)$$

В выражении (2) предполагается, что азимутальный угол каждого передатчика расположен случайно в интервале 0° – 360° и что можно пренебречь некоторым различием в положении передатчиков ВП-ФС внутри зоны развертывания. Плотность распределения может быть рассчитана для любого количества передатчиков путем повторения этого интеграла свертки. При реальных расчетах значение M_i было выбрано равным N_i и функции плотности распределения *pdfs* были рассчитаны для $N_i = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, 32\ 768$ передатчиков.

Прежде всего, допустим для $N_i = 1$, что угол места и угол азимута передающей антенны ВП-ФС соответственно равны ϵ_f и α_f . Угол места и угол азимута в направлении помехи, которые нужно определить, обозначим соответственно ϵ_u and α_u . В этом случае угол разноса, ϕ , между направлением антенны ВП-ФС и направлением помехи может быть рассчитан следующим образом:

$$\phi = \arccos(\cos \epsilon_f \cdot \cos \epsilon_u \cdot \cos(\alpha_f - \alpha_u) + \sin \epsilon_f \cdot \sin \epsilon_u). \quad (3)$$

Можно допустить без потери общности, что $\alpha_u = 0$ и что ϵ_u – это заданное значение (больше или равно 0). Кроме того, можно допустить, что α_f равномерно распределен в интервале $0^\circ \sim 360^\circ$. Требуется определить распределение ϵ_f , что будет более подробно рассмотрено в следующих разделах.

Если значение ϕ определить с помощью уравнения (3), усиление антенны ВП-ФС в направлении помехи будет рассчитано в соответствии с диаграммой направленности излучения антенны, определенной в Рекомендации МСЭ-R F.1245. Следовательно, можно определить *pdf* для с.э.и.и.м. при $N_i = 1$.

Тогда, для $N_i = 2$, *pdf* (с шагом 0,01 дБ) может быть рассчитана с помощью уравнения (2). Это может быть повторено для значений $N_i = 4, 8, 16, \dots, 32\ 768$.

В данном исследовании, в основном, применялся уровень доверительной вероятности 95%. Это означает, что вероятность того, что с.э.и.и.м. может превышать результаты расчета, менее 5%. Кроме того, некоторые результаты, т. е. таблица 3б, представлены с доверительной вероятностью 99,9%.

2.2 Вариант для антенн ВП-ФС при нулевом угле места

В данном случае предполагается, что углы места всех антенн ВП-ФС равны 0° ($\epsilon_f = 0$ для всех антенн ВП-ФС). Для $N_i = 1$ интервал азимутов в 180° был разделен на 10000 частей. Таким образом, была рассчитана вероятность для каждого интервала в 0,01 дБ. Так как уровень мощности передатчика не является важным показателем, то предполагается, что он равен 0 дБВт.

Для значений N_i больше 1, *pdf* рассчитывалась с помощью уравнения (2). На рисунке 5а показаны результаты для $G_i = 28$ дБ и $\epsilon_u = 0, 2,5, 5, 10, 15, 20$ градусов. На рисунке 5б показан случай для $G_i = 44$ дБ. Предполагается, что P_i во всех случаях равен 0 дБВт.

Следует отметить, что на рисунке 5а разница между кривыми $\epsilon_u = 0^\circ$ и $\epsilon_u = 2,5^\circ$ очень мала, так как ширина луча антенны с усилением 28 дБи составляет не менее $6,7^\circ$, в то время как на рисунке 5б разница между кривыми $\epsilon_u = 0^\circ$ и $\epsilon_u = 2,5^\circ$ очень велика, поскольку ширина луча антенны с усилением 44 дБи не превышает $1,1^\circ$.

Также следует отметить, что при $\epsilon_u = 0^\circ$ на рисунке 5б значение с.э.и.и.м. быстро растет при малом количестве передатчиков ВП-ФС, а при большем количестве передатчиков ВП-ФС рост замедляется. В таблице 3а приведены значения с.э.и.и.м. (дБВт) как функции от G_i (дБи) и количества передатчиков ВП-ФС (N_i) для варианта $\epsilon_u = 0^\circ$ при доверительной вероятности 95%.

В таблице 3б приведены результаты при доверительной вероятности 99,9%.

РИСУНОК 5а

с.э.и.и.м. в направлении различных углов места как функция от общего количества передатчиков ВП-ФС ($G_t = 28$ дБ и все углы места антенн ВП-ФС равны 0°)

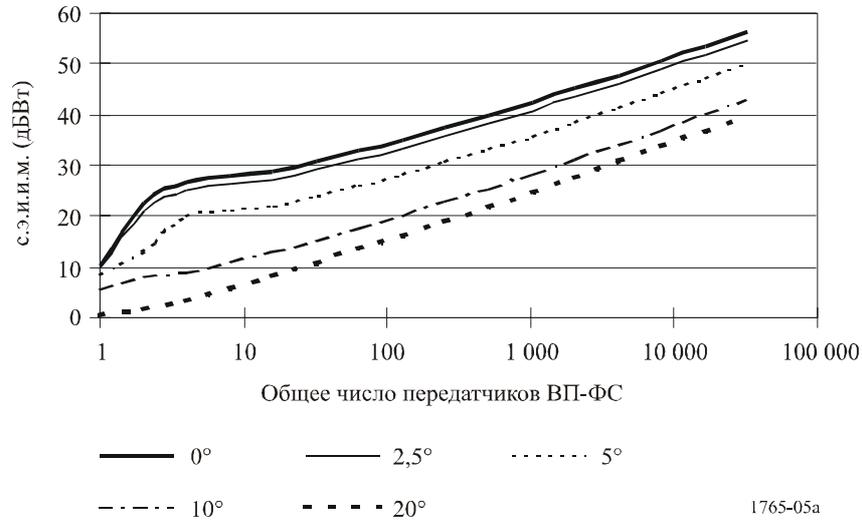


РИСУНОК 5б

с.э.и.и.м. в направлении различных углов места как функция от общего количества передатчиков ВП-ФС ($G_t = 44$ дБ и все углы места антенн ВП-ФС равны 0°)

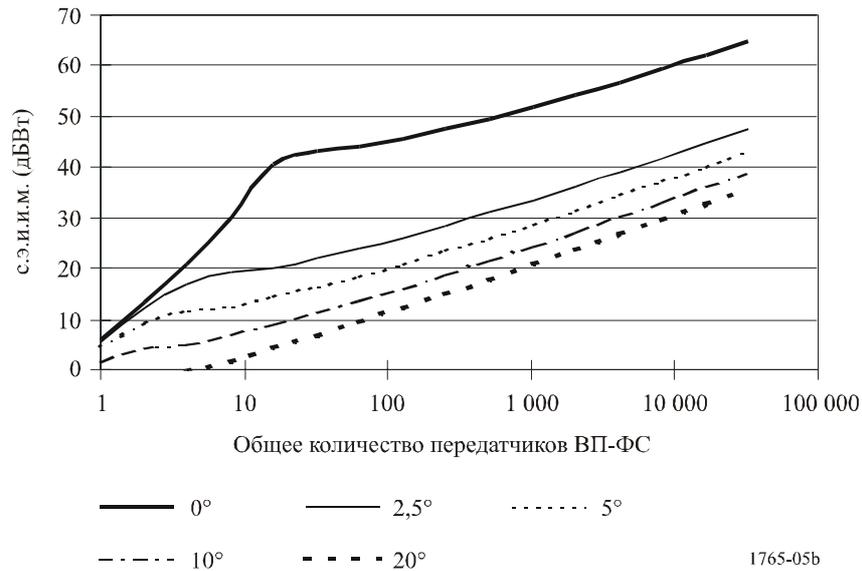


ТАБЛИЦА 3а

с.э.и.и.м. в дБВт как функция от G_i (дБи) и количества передатчиков (N_i)
(доверительная вероятность 95%)

G_i (дБ)	с.э.и.и.м. (дБВт) для различного количества передатчиков ВП-ФС ($N_i = 32 \sim 32\,768$)										
	32	64	128	256	512	1 024	2 048	4 096	8 192	16 384	32 768
28	30,86	32,81	34,97	37,29	39,75	42,34	45,04	47,82	50,66	53,54	56,46
30	32,35	34,18	36,25	38,51	40,92	43,47	46,14	48,89	51,72	54,58	57,49
32	33,69	35,49	37,54	39,74	43,11	44,61	47,24	49,96	52,76	55,62	58,52
34	34,89	36,89	38,84	41,00	43,31	45,77	48,36	51,05	53,83	56,67	59,55
36	36,10	38,38	40,20	42,27	44,53	46,94	49,49	52,15	54,90	57,72	60,59
38	37,98	39,72	41,51	43,56	45,76	48,13	50,63	53,26	55,98	58,78	61,63
40	39,84	40,92	42,90	44,86	47,01	49,33	51,79	54,38	57,07	59,84	62,68
42	41,62	42,12	44,39	46,22	48,29	50,54	52,96	55,50	58,16	60,91	63,73
44	43,24	43,98	45,74	47,53	49,58	51,78	54,14	56,65	59,27	61,99	64,79
46	44,72	45,85	46,94	48,92	50,88	53,03	55,34	57,80	60,39	63,08	65,86

ТАБЛИЦА 3б

с.э.и.и.м. в дБВт как функция от G_i (дБи) и количества передатчиков (N_i)
(доверительная вероятность 99%)

G_i (дБ)	с.э.и.и.м. (дБВт) для различного количества передатчиков ВП-ФС ($N_i = 32 \sim 32\,768$)										
	32	64	128	256	512	1 024	2 048	4 096	8 192	16 384	32 768
28	33,59	35,11	36,85	38,79	40,92	43,24	45,71	48,31	51,02	53,81	56,65
30	35,13	36,60	38,26	40,13	42,20	44,46	46,88	49,44	52,11	54,87	57,70
32	36,67	38,10	39,70	41,50	43,50	45,70	48,06	50,58	53,22	55,95	58,76
34	38,34	39,64	41,16	42,89	44,82	46,95	49,26	51,73	54,33	57,03	59,82
36	39,94	41,18	42,64	44,30	46,16	48,23	50,48	52,90	55,46	58,13	60,89
38	41,44	42,71	44,14	45,73	47,53	49,52	51,72	54,08	56,60	59,23	61,96
40	43,00	44,37	45,67	47,19	48,91	50,84	52,97	55,28	57,75	60,35	63,05
42	44,85	45,98	47,21	48,67	50,32	52,18	54,25	56,50	58,91	61,47	64,14
44	46,66	47,48	48,73	50,16	51,75	53,54	55,54	57,73	60,10	62,61	65,24

Была предпринята попытка найти подходящую формулу, которая бы аппроксимировала значения с.э.и.и.м. в таблице 3а с помощью метода минимаксной аппроксимации для двух переменных, и в качестве рациональной аппроксимации для $G_i = 28-46$ дБи и $N_i = 32-8192$ была получена следующая формула:

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_i + 1,061 (\log N_i)^2 + (-0,1164 G_i + 6,103) \log N_i + 0,9428 G_i - 2,62 \quad \text{дБВт} \quad (4)$$

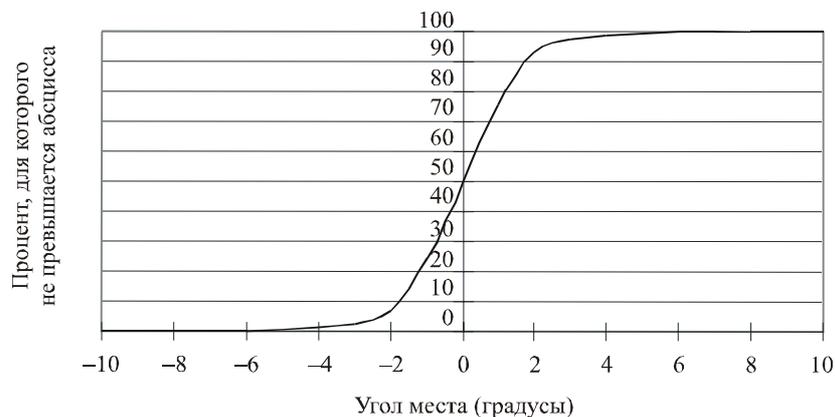
Эта формула и представлена в п. 1.1 раздела *рекомендует* основного текста. Максимальная погрешность аппроксимации данной формулы составляет 0,52 дБ. Для других значений ϵ_u был применен такой же способ аппроксимации и получены формулы, приведенные в пп. 1.2 ~ 1.8 раздела *рекомендует* основного текста. При значениях $\epsilon_u = 2,5^\circ$ или 5° кривые становятся более сложными, и, поэтому, для аппроксимирующей формулы требуется многочлен более высокого порядка.

2.3 Вариант для антенн ВП-ФС при различных углах места

Допущение, что углы места равны нулю, принятое в предыдущем разделе, является в некотором роде гипотетическим. В реальных ситуациях у антенн ВП-ФС углы места будут меняться. Однако типовую *pdf* углов места достаточно трудно установить. Для данного анализа в качестве примера *pdf* углов места антенн ВП-ФС будет использован рисунок 4. В то же время следует отметить, что все углы места на рисунке 4 равны 0 или положительны. В реальности резонно допустить, что углы места могут быть как положительными, так и отрицательными, и что *pdf* симметрична по отношению к нулевым углам места. Поэтому *pdf*, приведенная на рисунке 4, преобразована в симметричное распределение, которое показано на рисунке 6 и в таблице 4.

РИСУНОК 6

Интегральная кривая распределения углов места антенн ВП-ФС, соответствующая рисунку 4



1765-06

ТАБЛИЦА 4

Интегральное распределение углов места антенн ВП-ФС, соответствующее рисунку 4

Градусы	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
Проценты	0	0,023	0,06	0,145	0,31	0,6	1,2	2,7	6,95	24,15	50

Градусы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Проценты	75,85	93,05	97,3	98,8	99,4	99,69	99,855	99,94	99,977	100

При данных допущениях была рассчитана *pdf* с.э.и.и.м. для $N_t = 1$. Для больших значений N_t функции плотности распределения *pdfs* были рассчитаны с помощью уравнения (2). Результаты представлены на рисунках 7а и 7б. Предполагается, что значение P_t во всех случаях равно 0 дБВт.

РИСУНОК 7а

с.э.и.и.м. в направлении различных углов места как функция от общего количества передатчиков ВП-ФС ($G_t = 28$ дБ и углы места антенн ВП-ФС переменны)

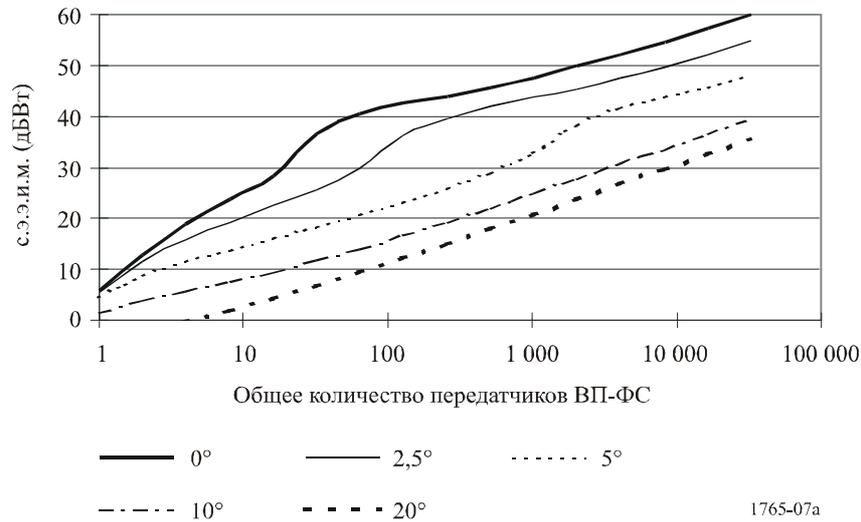
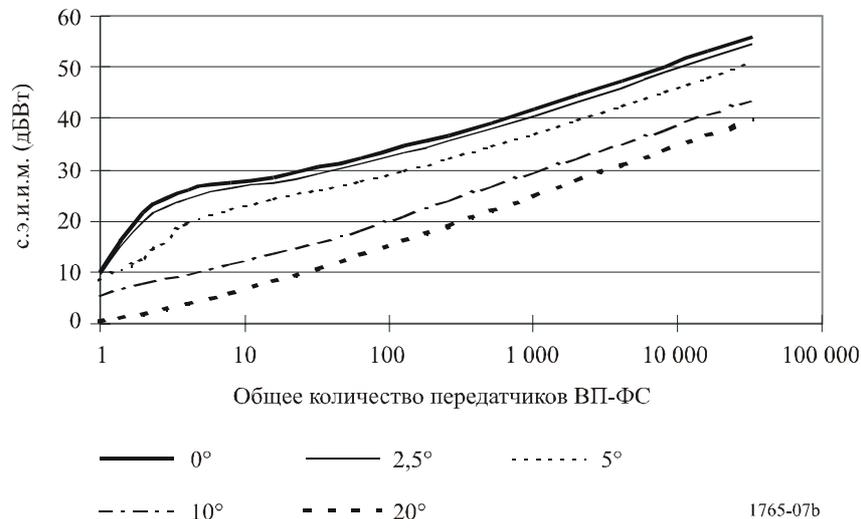


РИСУНОК 7б

с.э.и.и.м. в направлении различных углов места как функция от общего количества передатчиков ВП-ФС ($G_t = 44$ дБ и углы места антенн ВП-ФС переменны)



Если сравнить рисунки 5а и 7а, то видно, что разница между ними очень мала. Это означает, что при малом усилении антенн ВП-ФС, допущение о различных углах места мало влияет на значение с.э.и.и.м., так как ширина луча антенны достаточно велика. С другой стороны, разница между рисунками 5б и 7б велика, так как ширина луча антенны очень мала. Это означает, что степень влияния различных углов места меняется в зависимости от усиления антенн ВП-ФС.

Для интервалов значений $G_t = 28\text{--}46$ дБи и $N_t = 32\text{--}8192$ был получен ряд аппроксимирующих формул при различных значениях ε_u . Результаты представлены в п. 2 раздела *решает* основного текста. Можно отметить, что когда $\varepsilon_u = 0^\circ$, $2,5^\circ$ или 5° кривые становятся сложными, и поэтому для обеспечения хорошей аппроксимации требуются многочлены более высокого порядка.

3 Сравнение аналитической и вероятностной имитационной модели

Имитационная модель была создана для сравнения результатов, полученных в § 2. Эта модель основана на квадратной соте размером 1 км с заданной плотностью (равной в данном случае количеству) излучателей (УТ) ВП-ФС без какого-либо управления мощностью, при максимальном усилении антенн 44 дБи, диаграмме направленности антенн в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R F.1245 и углом места 0° , приемником, расположенным на случайном азимуте по отношению к соте ВП-ФС на расстоянии 100 км с усилением антенны 0 дБи.

В данном случае мощность, полученная приемником, рассчитывается по формуле (5)

$$P_r = AEIRP + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right), \quad (5)$$

где:

- P_r : мощность, полученная от 0 дБи антенны, расположенной на расстоянии d от соты ВП-ФС (дБВт)
- $AEIRP$: совокупная э.и.и.м. от УТ соты (дБВт)
- λ : длина волны (м)
- d : расстояние между сотой и антенной с усилением 0 дБи, где измеряется мощность (м).

Для одного единичного УТ P_r определяется формулой (6).

$$P_r = P_e + G_e + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right), \quad (6)$$

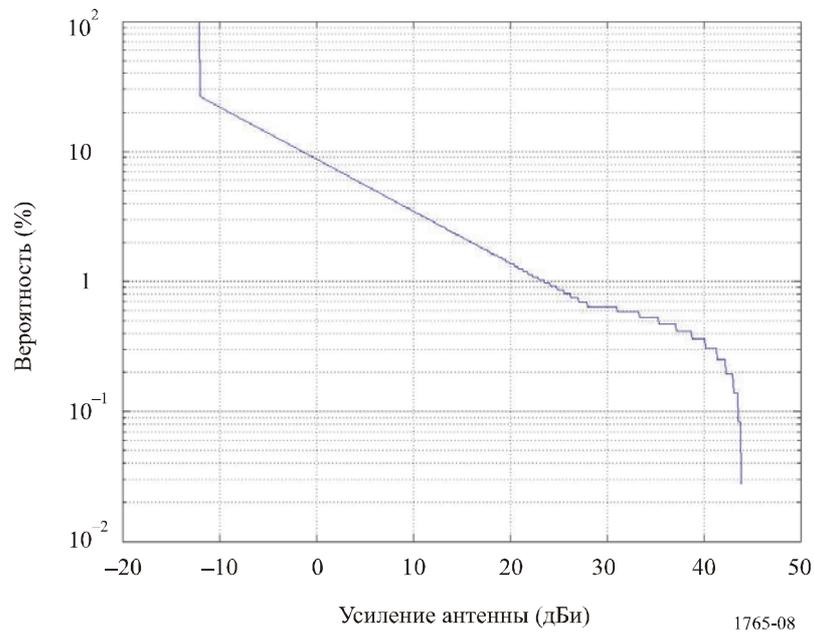
где:

- P_r : мощность полученная от 0 дБи антенны, расположенной на расстоянии d от соты ВП-ФС (дБВт)
- P_e : мощность излучения от одного УТ соты (дБВт)
- G_e : усиление антенны УТ в направлении 0 дБи антенны приемника
- λ : длина волны (м)
- d : расстояние между сотой и 0 дБи антенной, где измеряется мощность (м).

Усиление антенны является единственной переменной, значения которой находятся в интервале от -12 до 44 дБи в зависимости от азимута, следуя кривой *cdf* (интегральной функции распределения), представленной на рисунке 8.

РИСУНОК 8

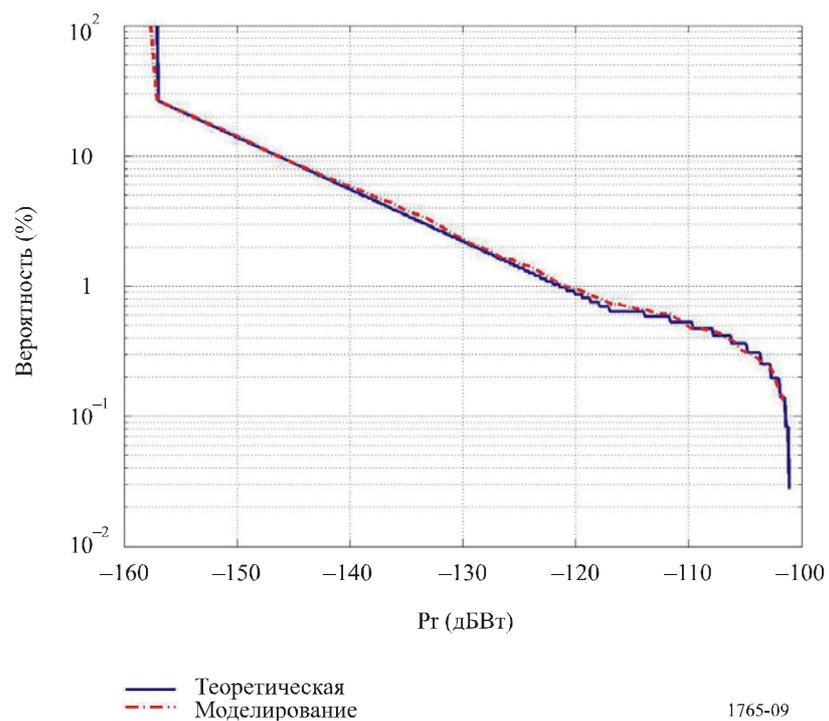
cdf (интегральная функция распределения) усиления антенны по Рекомендации МСЭ-R F.1245 при максимальном усилении антенны 44 дБи



Теоретическая мощность, полученная 0 дБи приемником, соответственно представлена на рисунке 9, также как и мощность, полученная для одного единичного передатчика ВП-ФС.

РИСУНОК 9

Мощность, полученная 0 дБи антенной, расположенной на расстоянии 100 км от УТ ВП-ФС с мощностью 20 дБВт



Допустив на этот раз, что мощность излучения равна 0 дБВт всех УТ, можно сравнить результаты, полученные от аналитического моделирования, приведенного в § 2 данного Приложения, и результаты, которые были получены путем вероятностного подхода при доверительной вероятности 95%, рассчитанные при более 10 000 выборках (см. таблицу 3а).

ТАБЛИЦА 5

Максимальное усиление антенны ВП-ФС 44 дБи

	с.э.и.и.м. (дБВт) для различного количества передатчиков ВП-ФС ($N_t = 32-2\ 048$)						
	32	64	128	256	512	1 024	2 048
Аналитическое моделирование	43,24	43,98	45,74	47,53	49,58	51,78	54,14
Вероятностное моделирование	43,33	43,94	45,73	47,37	49,59	51,81	54,19

ТАБЛИЦА 6

Максимальное усиление антенны ВП-ФС 28 дБи

	с.э.и.и.м. (дБВт) для различного количества передатчиков ВП-ФС ($N_t = 32-2\ 048$)						
	32	64	128	256	512	1 024	2 048
Аналитическое моделирование	30,86	32,81	34,97	37,29	39,75	42,34	45,04
Вероятностное моделирование	30,84	32,78	34,97	37,28	39,74	42,37	45,04

Сравнение результатов, полученных путем применения вероятностного и аналитического методов, показывает очень хорошую согласованность между ними.

Дополнение 1 к Приложению 1

Аппроксимирующие формулы для с.э.и.и.м.

Для облегчения компьютерной обработки в данном Дополнении представлены аппроксимирующие формулы из пп. 1 и 2 раздела *рекомендует* данной Рекомендации в табличной форме.

Формулы в п. 1 раздела *рекомендует* (углы места всех антенн ВП-ФС равны нулю)

Угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м.: 0° , $2,5^\circ$ или 5° :

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t + a_{30} (\log N_t)^3 + a_{20} (\log N_t)^2 + (a_{11} G_t + a_{10}) \log N_t \\ & + a_{03} G_t^3 + a_{02} G_t^2 + A_{01} G_t + a_{00}. \end{aligned}$$

ТАБЛИЦА 7а

Угол места для вычисления (градусы)	a_{30}	a_{20}	a_{11}	a_{10}	a_{03}	a_{02}	a_{01}	a_{00}
0	0	1,061	-0,1164	6,103	0	0	0,9428	-2,62
2,5	-0,13743	1,8243	0	1,5569	0,0052917	-0,57530	19,985	-200,77
5	0	0,54858	0	5,6488	-0,0036218	0,42380	-16,645	227,44

Угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м.: 10°, 15°, 20°, 25° или 30°:

$$\text{с.э.и.и.м.} = P_t + a_{10} \log N_t + a_{01} G_t + a_{00}.$$

ТАБЛИЦА 7б

Угол места для вычисления (градусы)	a_{10}	a_{01}	a_{00}
10	9,086	-0,25	8,30
15	9,344	-0,25	5,19
20	9,522	-0,25	3,19
25	9,633	-0,25	1,78
30	9,775	-0,25	0,74

Формулы в п. 2 раздела *рекомендует* (углы места всех антенн ВП-ФС различны).

Угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м.: 0°, 2,5° или 5°:

$$\begin{aligned} \text{с.э.и.и.м.} = & P_t + (a_{31} G_t + a_{30}) (\log N_t)^3 + (a_{22} G_t^2 + a_{21} G_t + a_{20}) (\log N_t)^2 \\ & + (a_{12} G_t^2 + a_{11} G_t + a_{10}) \log N_t + a_{03} G_t^3 + a_{02} G_t^2 + a_{01} G_t + a_{00}. \end{aligned}$$

ТАБЛИЦА 8а

Угол места для вычисления (градусы)	a_{31}	a_{30}	a_{22}	a_{21}	a_{20}	a_{12}
0	0	0,82096	0	-0,15210	0,92771	0,024504
2,5	0	0,93906	0	-0,31918	3,4110	0,023524
5	-0,10457	3,0618	0,027889	-1,1358	9,7775	-0,15803

Угол места для вычисления (градусы)	a_{11}	a_{10}	a_{03}	a_{02}	a_{01}	a_{00}
0	-1,0198	27,270	0	-0,077296	5,1982	-73,62
2,5	0,096937	-4,8156	0,0011791	-0,21452	8,5619	-82,88
5	9,3247	-132,36	0	0,20619	-13,901	247,30

Угол места для направления, в котором вычисляется с.э.и.и.м.: 10°, 15°, 20°, 25° или 30°:

$$с.э.и.и.м. = P_t + a_{10} \log N_t + a_{01} G_t + a_{00}.$$

ТАБЛИЦА 8б

Угол места для вычисления (градусы)	a_{10}	a_{01}	a_{00}
10	9,263	-0,2511	8,43
15	9,299	-0,25	5,45
20	9,497	-0,25	3,32
25	9,651	-0,25	1,84
30	9,767	-0,25	0,79