

## МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ДИАПАЗОНАХ ОВЧ И УВЧ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Диапазоны очень высоких (ОВЧ) и ультравысоких (УВЧ) частот используются для передачи информации в системах подвижной связи, в локальных сетях, системами радио- и телевизионного вещания, а также в спутниковых системах связи при низких и средних орбитах искусственных спутников Земли.

Основными механизмами распространения радиоволн (РРВ) в рассматриваемых диапазонах являются: дифракция, рефракция, распространение в свободном пространстве и вдоль земной поверхности. Данные механизмы могут действовать совместно или в различных комбинациях, в зависимости от физико-географических условий. Имеется ряд рекомендаций Международного союза электросвязи (ITU), которые позволяют учитывать те или иные механизмы РРВ: ITU-R PN.525. Расчет ослабления в свободном пространстве; ITU-R PN.526. Распространение радиоволн с учетом дифракции. В некоторых случаях приходится рассматривать и *расширенный перечень механизмов РРВ, которые могут привести к возникновению помех.* Для этого используются: ITU-R PN.534. Метод расчета напряженности поля при распространении посредством спорадического слоя E; ITU-R PN.452. Процедура прогнозирования для определения радиопомех между станциями на поверхности Земли на частотах выше 0,7 МГц (где учитываются все механизмы распространения, в том числе сверхрефракция).

Кроме того, имеется ряд полуэмпирических и эмпирических моделей для прогнозирования РРВ в диапазонах ОВЧ и УВЧ [1 — 7]. В них учитывается вся совокупность перечисленных механизмов РРВ. Назрела необходимость в сравнении известных моделей РРВ с точки зрения использования их для анализа электромагнитной совместимости.

Широко применяемые на практике кривые, представленные в рекомендации ITU-R P.370-7 [1], получены на основе статистического анализа большого объема экспериментальных данных. Эти кривые, отражающие зависимость напряженности полей от расстояния, рекомендованы для использования различными службами при расстояниях 10...1000 км в диапазоне частот 30...1000 МГц для эффективных высот передающей антенны  $H_{1,5\phi} = 37,5...1200$  м и высоты приемной  $h_2 = 10$  м, при параметре пере-

сеченности местности  $\Delta h = 50$  м ( $\Delta h$  — разница высот местности, превышаемых на 10 и 90 % длины участка в 10...50 км в направлении от передатчика к точкам приема).

На неровной местности в точках приема, удаленных на одинаковое расстояние от передающей станции, напряженность поля сигнала является случайной величиной. Она изменяется от точки к точке вследствие разного экранирующего действия рельефа а также во времени вследствие неустойчивого состояния тропосферы. По этой причине напряженность поля оценивают статистически — по процентам мест (точек) и времени приема (предполагается, что рельеф местности является регулярным).

Для аппроксимации кривых предварительно вычисляют расстояние, км: прямой видимости  $R_0 = 4,1(\sqrt{H_{1эф}} + \sqrt{h_2})$  и эквивалентное расстояние, км:  $R_e = R - R_0$ . При  $R \leq R_0$  (в зоне прямой видимости) медианное значение определяют в зависимости от расстояния [1]:

1) если  $1,5 \leq R < 10$  км, то

$$E(50,50) = 108 - 30,51 \lg R + (8,5 + 16,5 \lg R) \lg(H_{1эф} / 150);$$

2) если  $10 \leq R \leq 155$  км, то сначала определяют поправку на высоту передающей антенны:

$$K_3(H_{1эф}) = \chi \exp(H_{1эф} / 4600) \lg(H_{1эф} / 300),$$

а затем находят

$$E(50,50) = \begin{cases} 100 \exp[-Y(\lg R)^3] + K_3(H_{1эф}), & 10 \leq R \leq 84 \text{ км}; \\ 85 \exp[-0,0125(R - 84)] + K_3(H_{1эф}) - \Psi, & 84 < R < 155 \text{ км}. \end{cases}$$

Здесь  $\chi, Y, \Psi$  — коэффициенты, зависящие от частоты (таблица).

При  $R > R_0$  медиану рассчитывают в зависимости от  $R_e$ : сначала в зоне дифракции, а затем в зоне дальнего тропосферного РРВ:

$$E(50,50) = \begin{cases} 35 \exp[-0,0125 R_e] - \Psi, & 0 < R \leq 125 \text{ км}; \\ \xi - \mu R_e, & 125 < R < 600 \text{ км}, \end{cases}$$

где  $\xi, \mu$  — коэффициенты (таблица).

Частота, МГц	Y	Ψ	χ	ξ	μ
30...250	0,150	0	23	16	0,096
450...1000	0,165	7	27	12	0,108

Погрешность аппроксимации составляет 0,1...1 дБ на расстояниях 10...100 км.

В [2] изложен метод расчета медианных потерь, дБ, согласно которому

$$L = 85,8 + 40 \lg R + 20 \lg f - 20 \lg H_{1\text{эф}} h_2,$$

где  $f$  — частота сигнала, МГц.

Формула подтверждается результатами измерений в диапазоне 50...910 МГц на расстояниях 1,5...65 км для  $H_{1\text{эф}} = 1,5...1500$  м;  $h_2 = 1,5...300$  м;  $\Delta h = 50$  м.

В [3] медианные потери распространения предполагается рассчитывать по формуле

$$L = 69 - 24 \lg H_{1\text{эф}} - 10 \lg h_2 + 20 \lg f + 54 \lg R.$$

Формула справедлива в диапазоне 30...1000 МГц при расстояниях 5...100 км,  $H_{1\text{эф}} = 37,5...600$  м;  $h_2 = 1...40$  м;  $\Delta h = 50$  м.

В [4] приведена полуэмпирическая формула для потерь, дБ, справедливая в диапазоне 100...1000 МГц для типичной сельской или пригородной местности с  $\Delta h = 15$  м:

$$L = 120 - 20 \lg H_{1\text{эф}} h_2 + 10 \lg f + 40 \lg R.$$

В [5] даны формулы, позволяющие в диапазоне 100...1500 МГц рассчитать потери в открытой пригородной или городской местности, с учетом интенсивности застройки при расстояниях 1...20 км для  $H_{1\text{эф}} = 30...200$  м и  $h_2 = 1...10$  м. В пригородной зоне небольшого города, для которой можно принять  $\Delta h = 50$  м, потери, дБ, можно рассчитать по формулам

$$L = L_r - 2[\lg(f/28)]^2 - 5,4;$$

$$L_r = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg H_{1\text{эф}} h_2 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \lg H_{1\text{эф}}) \lg R;$$

$$a(h_2) = (1,1 \lg f - 0,7) h_2 - 1,56 \lg f + 0,8.$$

Эмпирическая модель [6] учитывает все механизмы распространения. Автор модели отмечает, что расчет может приводить к значительным ошибкам в следующих случаях: если существуют условия прямой видимости на большом расстоянии (антенна находится выше предметов окружающей местности); антенны размещены вблизи проводящих препятствий; местность является гористой.

На рис. 1, 2 представлены результаты сравнительной оценки описанных методов при следующих исходных данных:  $f = 250$  МГц и  $f = 900$  МГц соответственно;  $H_{1\text{эф}} = 37,5$  м;  $h_2 = 10$  м;  $\Delta h = 50$  м;  $R = 10...100$  км. Для приведения результатов к одинаковому параметру пересеченности местности при расчете по методу [4] взят поправочный коэффициент по  $\Delta h$ .

Проанализировав рис. 1, можно сделать вывод о том, что разброс параметров медианного значения напряженности поля растет с увеличением расстояния. Если сравнить все методы с методом [1] на основе ГТУ-R Р.370-7, то можно заметить, что наиболее близкое приближение к его результатам на расстоянии до 30 км дает метод [2]; на расстоянии 30...60 км — методы [3; 4]

(максимальный разброс параметров 4 дБ); при 60...100 км ~~на расстоянии~~ приближением обладает метод [4] (максимальный разброс параметров 3 дБ). Остальные методы в большей степени отличаются от рекомендации ITU-R P.370-7. Наиболее завышенные показания дает метод [5] (максимальное расхождение на расстоянии 100 км составляет 16 дБ).

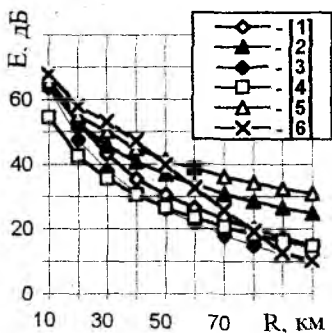


Рис. 1

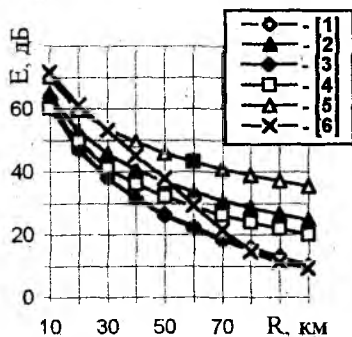


Рис. 2

Наибольшая погрешность соответствует методу [6].

На частотах 900 МГц (см. рис. 2) наибольшее совпадение с результатами [1] обеспечивает метод [3]: максимальный разброс на расстоянии 100 км составляет всего 0,5 дБ. Остальные методы дают завышенные параметры медианного значения напряженности поля.

РРВ для наземных сухопутных подвижных средств связи в диапазонах ОВЧ и УВЧ определяется в различной степени топологией местности, растительностью, степенью застройки местности, постоянными Земли, состоянием тропосферы. В рекомендации ITU-R P.529-2 [7] приведены кривые медианного значения напряженности поля для ОВЧ- и УВЧ-диапазонов при высоте антенны портативной станции  $h_2 = 1,5$  м, высотах антенны базовой станции  $H_{1эф}$  от 10 до 600 м и  $\Delta h = 50$  м. Эти кривые справедливы для сельской местности. Для пригородной зоны и для города рекомендуется уменьшить медианное значение напряженности поля на 3 и 5 дБ соответственно. Кривые получены при пересчете зависимостей рекомендации ITU-R P.370-7 на высоту приемной антенны  $h_2 = 1,5$  м при  $\Delta h = 50$  м. Следует учитывать, что для базовой станции используется эффективная высота антенны, а для портативной станции высота антенны отсчитывается от поверхности Земли.

Кроме того, в рекомендации ITU-R P.529-2 для диапазона частот около 450 МГц и 900 МГц и высот антенн базовых станций 30...1000 м и мобильных станций 1,5 м для города имеются графические зависимости

медианного значения напряженности поля от расстояния, полученные эмпирическим путем для городов Японии. Зависимости могут быть аппроксимированы функцией Окамуры — Хата:

$$E = 65,55 - 6,16 \lg f + 13,82 \lg H_{1\text{эф}} + a(h_2) - (44,9 - 6,55 \lg H_{1\text{эф}}) \lg R^b,$$

где  $f$  — частота, МГц;  $H_{1\text{эф}}$  — эффективная высота антенны базовой станции (30...200 м);  $h_2$  — высота антенны мобильной станции (1...10 м);

$$a(h_2) = (1,1 \lg f - 0,7) h_2 - (1,56 \lg f - 0,8);$$

$$b = 1, R \leq 20 \text{ км}; b = 1, R \leq 20 \text{ км};$$

$$b = 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^{-4} f + 1,07 \cdot 10^{-3} H_{1\text{эф}}) (\lg \frac{R}{20})^{0,8}, \quad 20 < R < 100 \text{ км}.$$

Как показала проверка, графики, приведенные в рекомендации для  $f = 900$  МГц и  $f = 450$  МГц (рис. 3, 4, кривые 1), не совпадают с результатами расчетов по формуле Окамуры — Хата (рис. 3, 4, кривые 2 для  $f = 450$  МГц и  $f = 900$  МГц соответственно). Очевидно, в рекомендации допущена опечатка и данные получены в результате пересчета зависимостей рекомендации ITU-R P.370-7 на высоту приемной антенны  $h_2 = 1,5$  м с учетом поправки на расположение приемной антенны в городе. Проанализировав зависимость, отражающую дополнительное ослабление напряженности поля в городе, и поправочные коэффициенты, указанные в рекомендации ITU-R P.370-7, можно сделать вывод о том, что они справедливы для города с 10 % -й плотностью застройки. Кривые 2 на рис. 3, 4 проходят ниже кривых 1, а следовательно, формула Окамуры — Хата справедлива для города с большей плотностью застройки.

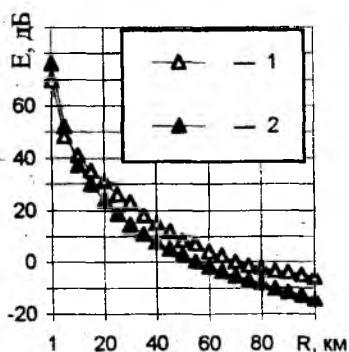


Рис. 3

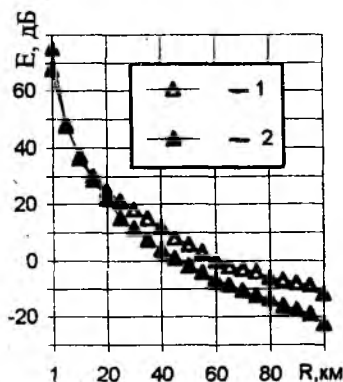


Рис. 4

Полученные результаты позволяют ориентироваться в моделях РРВ при решении задач электромагнитной совместимости.

Список литературы: 1. *Сети телевизионного и звукового ОБЧ ЧМ-вещания*: Справ. / Под ред. М.Г. Локшина. М.: Радио и связь, 1988. 144 с. 2. *Egli J.J. Radio propagation above 40 Mc over irregular terrain* // Proc. of the IRE. 1957. Vol. 45, N 10. P. 5 — 8. 3. *Рубин Г.З. Формулы для расчета напряженности поля в УКВ-диапазоне* // Экспресс-информ. Центра науч.-техн. информ. «Информ-связь». Сер. Радиосвязь, радиовещание, телевидение. 1977. Вып. 3: Проектирование сооружений связи. С. 10 — 20. 4. *Grzybkowski M.J., Wojnar A.H. Validation of the fourth-power law in radio propagation* // 7 th Intern. Symp. on EMC. Wroclaw, 1984. P. 3 — 6. 5. *Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service* // IEEE Trans. 1980. Vol. VT-29, N 3. P. 317 — 325. 6. *Lustgarten M.N. An empirical propagation model (EPM-73)* // IEEE Trans. on EMC. 1997. Vol. 19, N 3. P. 301 — 309. 7. *ITU-R P.529. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands* / Intern. Telecommunication Union (ITU). S.I., 1999.

Харьковский государственный технический  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 01.04.99