

УДК 621.396:621391.82

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ, ОБРАЗУЕМОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ НАЗЕМНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ, НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

В.И. МОРДАЧЁВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 21 мая 2008

Приведены результаты моделирования распределений вероятности сигналов радиоэлектронных средств размещенных на поверхности Земли и определяющих электромагнитную обстановку над ее поверхностью, по энергетическому параметру и по углу визирования направления прихода в точке наблюдения, размещенной над поверхностью на определенной высоте.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка, угол визирования, плотность потока мощности, распределение вероятности.

### Введение

Внешние условия эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС), размещаемых на летательных аппаратах различных типов (самолеты, вертолеты, ракеты и т.п.) и на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) обладают рядом особенностей, которые следует учитывать при обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) этих РЭС по отношению к РЭС, размещаемым на поверхности Земли. С увеличением высоты точки размещения РЭС над земной поверхностью уменьшается вероятность присутствия вблизи РЭС мощных источников электромагнитных излучений (ЭМИ), что влечет снижение динамического диапазона сигналов в рассматриваемой точке. Вместе с тем с увеличением высоты подъема РЭС значительно увеличивается зона прямой видимости и соответственно число посторонних радиосигналов на входе радиоприемного устройства (РПУ) РЭС, по уровню превышающих порог его восприимчивости.

В основу подхода к статистическому моделированию электромагнитной обстановки (ЭМО) может быть положена методика [1], предполагающая случайное равномерное размещение источников ЭМИ равной эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) на плоской поверхности, и использующая модель распространения радиоволн (РРВ) в виде гиперболической зависимости плотности потока мощности электромагнитного поля  $\Pi$  от расстояния  $R$  до его источника:

$$\Pi = \frac{C_v P_{etr}}{R^v}, \quad C_v = \text{const}, \quad (1)$$

где  $P_{etr}$  — эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ);  $C_v$  — константа;  $v$  — параметр, определяющий "скорость" затухания электромагнитного поля по мере увеличения рас-

стояния до источника излучения. В частности,  $\nu=2$  при РРВ в свободном пространстве;  $\nu=4$  при РРВ с интерференцией прямого и отраженного лучей в дальней зоне [2–7].

Для плоской модели земной поверхности в [1, 2, 4] определены следующие модели:

Модель пространственной области потенциального мешающего взаимодействия РЭС в виде круговой области радиуса

$$R_{\max} = (C_{\nu} P_{\text{etr}} / \Pi_{\min})^{1/\nu} \quad (2)$$

вокруг точки размещения на поверхности РЭС-рецептора помех, порог восприимчивости которого равен  $\Pi_{\min}$ .

Плотность распределения вероятности удаленности РЭС-источника ЭМИ от РЭС-рецептора помехи:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2}; \quad R \leq R_{\max}. \quad (3)$$

Плотность распределения вероятности  $w(\Pi)$  плотности потока мощности сигналов в точке размещения РЭС-рецептора помех на плоской поверхности:

$$w(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu} \Pi_{\max}^{2/\nu}}{\nu(\Pi_{\max}^{2/\nu} - \Pi_{\min}^{2/\nu})\Pi^{(2+\nu)/\nu}}; \quad \Pi \in [\Pi_{\min}, \Pi_{\max}], \quad \Pi_{\max} = \frac{C_{\nu} P_{\text{etr}}}{R_{\min}^{\nu}}, \quad (4)$$

где  $R_{\min}$  — минимальное расстояние до ближайшего РЭС-источника ЭМИ — дополнительно введенное в [1] искусственное ограничение на минимально возможное расстояние до ближайшего источника ЭМИ, обеспечивающего существование начальных и центральных моментов распределения (4); при отсутствии этого ограничения

$$w(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu}}{\nu\Pi^{(2+\nu)/\nu}}; \quad \Pi \geq \Pi_{\min}. \quad (5)$$

Плотность распределения вероятности угла визирования источников ЭМИ, размещенных на плоской поверхности, из точки над поверхностью [4]:

$$w(\varepsilon) = \frac{2}{\text{ctg}^2 \varepsilon_{\min}} \frac{\cos \varepsilon}{\sin^3 \varepsilon}, \quad \varepsilon \in [\varepsilon_{\min}, \pi/2]. \quad (6)$$

Непосредственное использование этих моделей для описания статистических характеристик ЭМО на значительной высоте над поверхностью Земли, когда кривизной земной поверхности и высотой точки размещения РЭС-рецептора помех пренебречь нельзя, без должного обоснования представляется некорректным. Данная работа посвящена обоснованию вида моделей (3)–(6), учитывающих кривизну земной поверхности в зоне прямой видимости и высоту точки наблюдения над поверхностью.

### Плотность распределения вероятности сигналов над сферической поверхностью Земли по энергетическому параметру

Рассмотрим случай, когда точка наблюдения ТН, соответствующая точке размещения РЭС, находится на определенной высоте  $H$  над поверхностью, а также учтем сферичность земной поверхности (рис. 1). Будем полагать, что на поверхности в зоне прямой видимости случайно с плотностью  $\rho(\alpha, R)$  (единиц/км<sup>2</sup>) размещены РЭС-источники ЭМИ; здесь и на рис. 1  $\alpha, \varepsilon$  — горизонтальный (азимут) и вертикальный углы визирования РЭС-источников ЭМИ из точки наблюдения.

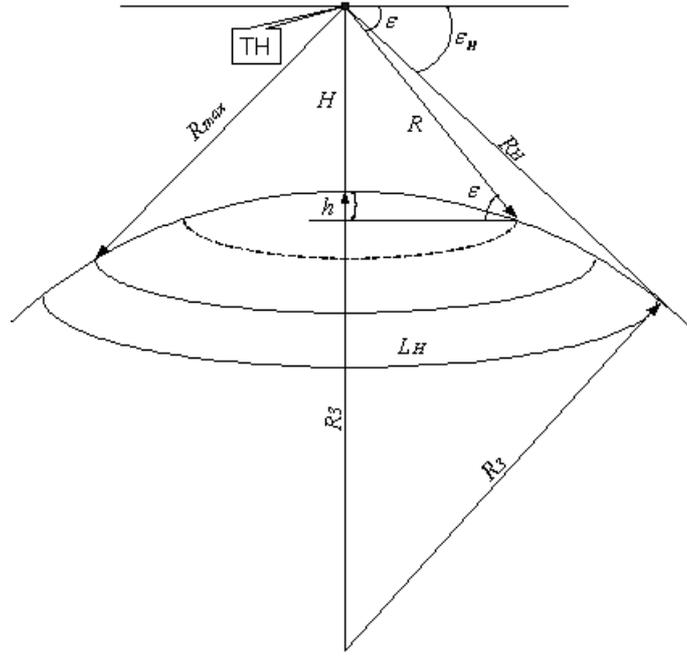


Рис. 1. Схема расположения точки наблюдения на высоте  $H$  над земной поверхностью:  $L_H$  — линия горизонта;  $\varepsilon_H$  — угол визирования горизонта;  $R_3$  — радиус Земли (с учетом рефракции);  $R_H$  — удаленность линии горизонта от точки наблюдения;  $R_H \geq R_{max}$

Площадь  $S_{шс}$  шарового сегмента высоты  $h$ , ограничиваемого удаленностью  $R$  от точки, поднятой на высоту  $H$  над сферической поверхностью радиуса  $R_3$ , равна:

$$S_{шс} = \pi R_3 (R^2 - H^2) / (R_3 + H).$$

Отсюда среднее число источников ЭМИ в ограниченном элементарными приращениями  $d\alpha, dR$  элементе шарового слоя, наблюдаемого на расстоянии  $R$  и по азимуту  $\alpha$  из точки размещения РЭС, будет определяться соотношением:

$$dN(\alpha, R) = \rho(\alpha, R) dS_{шс}(R, d\alpha, dR) = \frac{R_3}{R_3 + H} R \rho(\alpha, R) d\alpha dR.$$

В результате получаем общее выражение для совместной плотности распределения  $w(\alpha, R)$  вероятностей азимута и удаленности источников ЭМИ по отношению к точке наблюдения и для среднего числа  $N_{Scp}$  источников ЭМИ в области потенциального мешающего взаимодействия РЭС, ограниченной удаленностью  $R_{max}$ :

$$w(\alpha, R) = \frac{1}{N_{Scp}} \frac{dN(\alpha, R)}{d\alpha dR} = \frac{R_3}{N_{Scp} (R_3 + H)} R \rho(\alpha, R), \quad (7)$$

$$N_{Scp} = \frac{R_3}{R_3 + H} \int_H^{R_{max}} \int_0^{2\pi} R \rho(\alpha, R) d\alpha dR;$$

$$R \in [H, R_{max}], \quad R_{max} \leq R_H = \sqrt{2R_3 H + H^2} \approx \sqrt{2R_3 H}; \quad \alpha \in [0, 2\pi]. \quad (8)$$

При равномерном пространственном распределении источников в пределах поверхности сферического сегмента, ограниченной удаленностью  $R_{max}$ , имеем  $\rho(\alpha, R) = \rho = \text{const}$ , и распределение (7) приобретает следующий вид:

$$w(\alpha, R) = w(\alpha)w(R) = \frac{R}{\pi(R_{\max}^2 - H^2)} = \frac{1}{2\pi} \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}; \quad (9)$$

$$w(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}. \quad (10)$$

Таким образом, при  $\rho(\alpha, R) = \rho = \text{const}$  вид  $w(\alpha, R)$  инвариантен к кривизне земной поверхности и зависит исключительно от вида функции  $\rho(\alpha, R)$  средней территориальной плотности источников (от их координат). Для случая равномерного распределения источников по территории плотности распределения (3) и (10) отличаются только областями определения величины  $R$  и, соответственно, нормирующими множителями.

Отсюда следует принципиально важный вывод о том, что и вид плотности распределения вероятности  $w(\Pi)$  плотности потока мощности сигналов в точке размещения РЭС-рецептора помех над плоской поверхностью при свободном РРВ инвариантен к кривизне земной поверхности и к высоте подъема точки наблюдения над поверхностью и соответствует модели (4) с областью определения, правая граница которой определяется высотой подъема над земной поверхностью:

$$\Pi_{\max} = C_{\nu} P_{\text{etr}} / H^{\nu}, \quad \nu=2.$$

В этом нетрудно убедиться, используя модель (10) для определения по известным правилам закона распределения вероятности  $w(\Pi)$  с использованием функционального преобразования (1).

Этот вывод существенно расширяет области применимости базовой модели (4) статистической теории ЭМС [1], где эта модель использована для описания статистических характеристик ЭМО в точке на плоской поверхности от размещенных на этой поверхности РЭС-источников ЭМИ. Введенное в [1] искусственное ограничение на минимально допустимое расстояние до ближайшего РЭС-источника ЭМИ, существенно ослабляющее адекватность модели для случаев совпадения (пересечения) областей возможного пространственного размещения точки наблюдения и РЭС-источников ЭМИ, в рассматриваемом случае приобретает естественный характер: минимальное расстояние до ближайшего РЭС-источника ЭМИ может быть принято равным высоте подвеса точки наблюдения над поверхностью с размещенными на ней источниками.

В заключение следует отметить также ряд важных особенностей данных моделей.

1. Модель (7) совместной плотности распределения  $w(\alpha, R)$  вероятностей азимута и удаленности источников ЭМИ по отношению к точке наблюдения позволяет определить статистические характеристики ансамбля сигналов, образующих ЭМО в точке наблюдения, при произвольном виде зависимости средней пространственной плотности  $\rho(\alpha, R)$  РЭС-источников сигналов от координат. Это имеет существенный практический интерес, поскольку с увеличением высоты точки наблюдения над поверхностью и соответствующим расширением границ области прямой видимости и/или области потенциального мешающего взаимодействия РЭС возможности использования допущения о близком к равномерному случайном пространственном размещении РЭС-источников ЭМИ ( $\rho(\alpha, R) = \rho = \text{const}$ ) в ряде случаев становятся менее очевидными. С другой стороны, использование ГИС технологий позволяет определить функцию  $\rho(\alpha, R)$  для значительных территорий с учетом границ населенных пунктов и промышленных зон, транспортных коммуникаций и других объектов и территориальных образований, насыщенных радиооборудованием.

2. Очевидно, что инвариантность модели (7) к кривизне земной поверхности и к высоте подъема точки наблюдения над поверхностью означает ее инвариантность к высоте точки наблюдения над поверхностью и в случае, когда кривизна земной поверхности в расчет не принимается, что согласуется с предложениями [4] по стандартизации моделей ЭМО.

3. Все приведенные модели и соображения в силу присущего рассматриваемой задаче дуализма справедливы и для "обратной" ситуации, когда в точке наблюдения над поверхностью

земли размещается РЭС-источник ЭМИ, а в области потенциального мешающего взаимодействия радиуса  $R_{max} \leq R_H$  случайно с плотностью  $\rho(\alpha, R)$  либо случайно равномерно располагаются РЭС-рецепторы помех, имеющие порог восприимчивости  $P_{min}$ . Применительно к этой ситуации модели (7)–(10) описывают плотность распределения  $w(\alpha, R)$  вероятностей азимута и удаленности РЭС-рецепторов ЭМИ по отношению к точке наблюдения и для среднего числа  $N_{ср}$  рецепторов ЭМИ в области потенциального мешающего взаимодействия РЭС, а модель (4) описывает плотность распределения вероятности плотности потока мощности сигнала в точке размещения на поверхности произвольно выбранного РЭС-рецептора помех от поднятого над поверхностью РЭС-источника ЭМИ.

### Плотность распределения вероятности сигналов над сферической поверхностью Земли по углу визирования направления прихода

При размещении точки наблюдения над плоской поверхностью с размещенными на ней РЭС-источниками ЭМИ величины  $R$  и  $\varepsilon$  (угол визирования источника радиосигнала) связаны; для этого случая  $R=H / \cos \varepsilon$ . Отсюда для случая  $\rho(\alpha, R)=\rho=\text{const}$  нетрудно получить модель (6) плотности распределения вероятности угла визирования источника радиосигнала [4].

В случае учета сферичности земной поверхности, вид  $w(\varepsilon)$  существенно усложняется. Если ограничиться рассмотрением углов визирования, соответствующих направлениям прихода радиосигнала между перпендикуляром и касательной к сферической земной поверхности, распределение  $w(\varepsilon)$  имеет следующий вид:

$$w(\varepsilon) = A_1(\varepsilon) + A_2(\varepsilon) - A_3(\varepsilon); \quad (11)$$

$$\varepsilon \in [\varepsilon_H, \pi/2], \quad \varepsilon_H = \arccos[R_3/(R_3 + H)];$$

$$A_1(\varepsilon) = \frac{(R_3 + H) \cos \varepsilon \sqrt{R_3^2 - (R_3 + H)^2 \cos^2 \varepsilon}}{R_3 H};$$

$$A_2(\varepsilon) = \frac{(R_3 + H)^3 \sin \varepsilon \sin 2\varepsilon}{2R_3 H \sqrt{R_3^2 - (R_3 + H)^2 \cos^2 \varepsilon}};$$

$$A_3(\varepsilon) = \frac{(R_3 + H)^2 \sin 2\varepsilon}{R_3 H};$$

область определения этой модели ограничена углом  $\varepsilon_H$  визирования линии горизонта.

Во многих случаях вместо достаточно громоздкой модели (11) может использоваться существенно более простая модель (6). Эта замена особенно эффективна для высот полета самолетов, т.е. для точки размещения РЭС-рецептора помех не более 10–20 км над земной поверхностью, а также при выборе следующей области определения модели (6):

$$\varepsilon \in [\varepsilon_{min}, \pi/2], \quad \varepsilon_{min} = \varepsilon_H/2. \quad (12)$$

Для такой области определения модели (6) она обеспечивает очень хорошее совпадение с моделью (11) в области углов визирования  $[1,5\varepsilon_H, \pi/2]$ . В области углов визирования вблизи горизонта  $[\varepsilon_H, 1,5\varepsilon_H]$  следует пользоваться точной моделью (11); часть  $[\varepsilon_H, \varepsilon_H/2]$  области (12) введена из технических соображений и не имеет практического смысла.

На рис. 2–5 приведены расчетные кривые распределений (6), (11) для различных значений высоты  $H$  РЭС-рецептора помех над земной поверхностью при  $R_3=8500$  км (с учетом рефракции) и для различных значений левой границы области определения аргумента в (6); на этих

рисунках сплошная линия соответствует модели (6), обозначенной как  $w_p(\varepsilon)$ ; прерывистая линия соответствует модели (11), обозначенной как  $w_s(\varepsilon)$ . На правых частях рисунков приведены изображения  $w_p(\varepsilon)$ ,  $w_s(\varepsilon)$  в области малых углов визирования, в которой различия между моделями (6) и (11) могут быть существенными. На рис. 6 приведены те же расчетные кривые для высоты  $H=10$  км и для области определения  $[\varepsilon_H, \pi/2]$  модели (6). Сравнение рис. 6 и рис. 3 свидетельствует о практической невозможности замены модели (11) моделью (6) без корректировки (12).

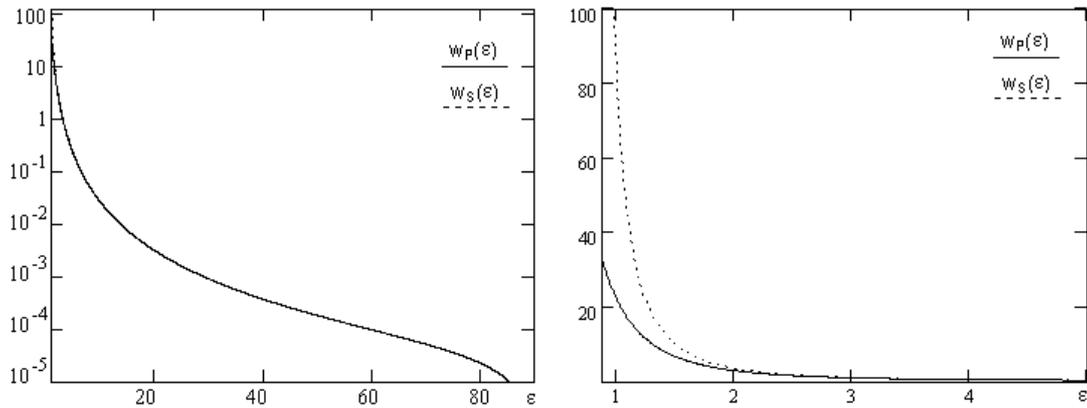


Рис. 2. Расчетные кривые распределений (6), (11): высота  $H$  РЭС-рецептора помех над земной поверхностью 1 км при  $R_3=8500$  км;  $\varepsilon_H \approx 0,9^\circ$ ,  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H/2$

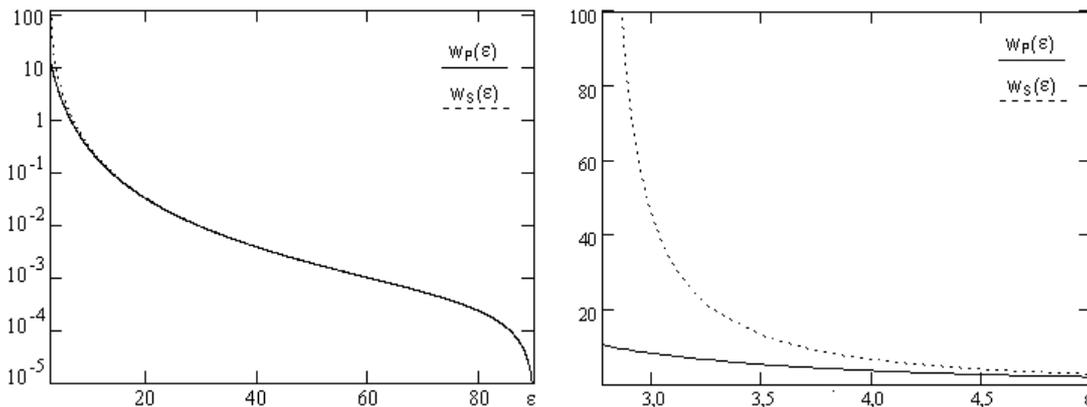


Рис. 3. Расчетные кривые распределений (6), (11): высота  $H$  РЭС-рецептора помех над земной поверхностью 10 км при  $R_3=8500$  км;  $\varepsilon_H \approx 2,8^\circ$ ,  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H/2$

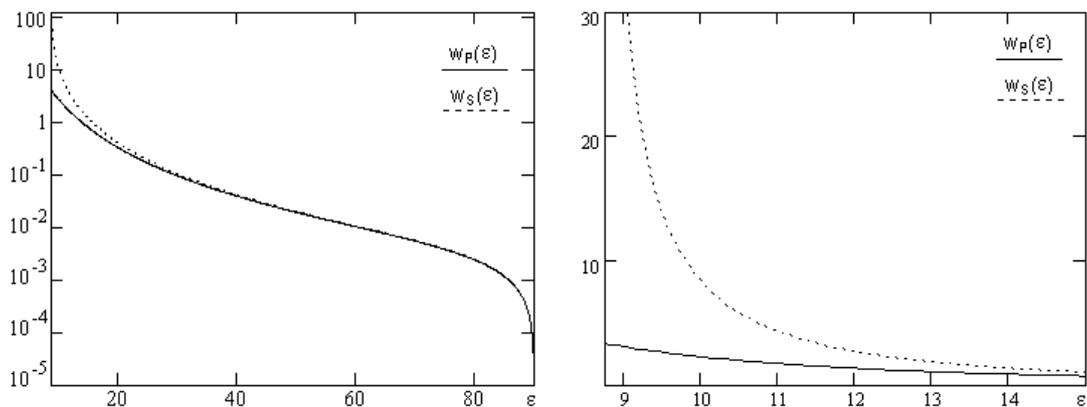


Рис. 4. Расчетные кривые распределений (6), (11): высота  $H$  РЭС-рецептора помех над земной поверхностью 100 км при  $R_3=8500$  км;  $\varepsilon_H \approx 8,8^\circ$ ,  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H/2$

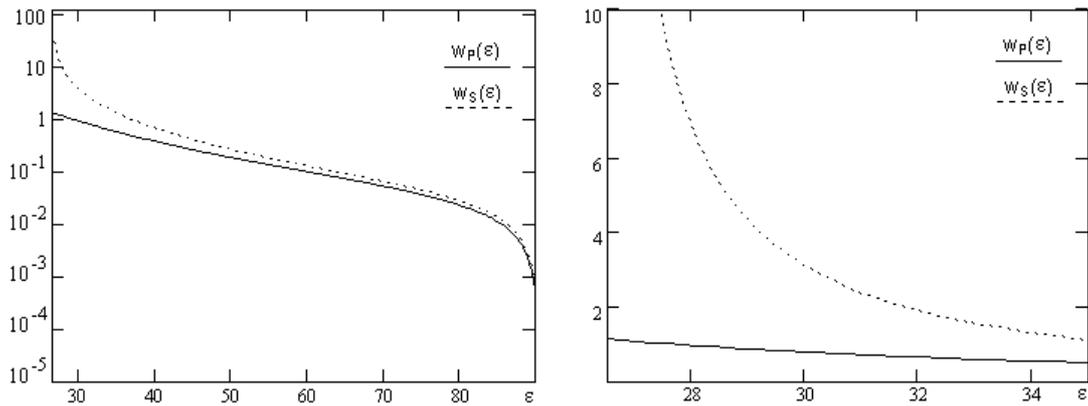


Рис. 5. Расчетные кривые распределений (6), (11): высота  $H$  РЭС-рецептора помех над земной поверхностью 1000 км при  $R_3=8500$  км;  $\varepsilon_H \approx 26,5^\circ$ ,  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H/2$

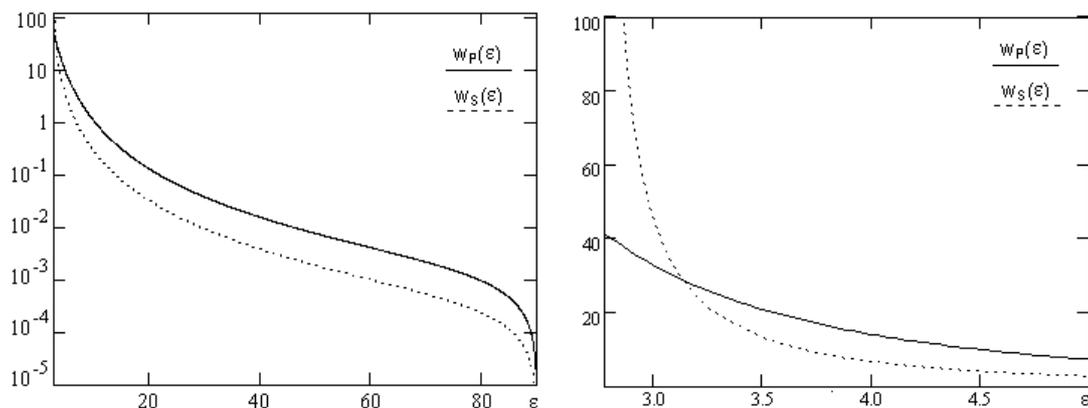


Рис. 6. Расчетные кривые распределений (6), (11): высота  $H$  РЭС-рецептора помех над земной поверхностью 10 км при  $R_3=8500$  км;  $\varepsilon_H \approx 2,8^\circ$ ,  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H$

Сравнительный анализ моделей (6) и (11) на основе данных рис.2-6 позволяет сделать следующие выводы:

Применение модели (6) при  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H/2$  обеспечивает очень хорошее совпадение с моделью (11) для широкого диапазона высот точки наблюдения при углах визирования более  $1,5 \varepsilon_H$ .

Применение модели (6) при высотах точки наблюдения, соответствующих диапазону высот установившегося полета современных пассажирских и транспортных самолетов, и при  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H$  обеспечивает существенно завышенную плотность вероятности при углах визирования менее  $3,5^\circ - 4,0^\circ$ , т.е. при превышении углом визирования менее чем на  $1,5^\circ$  угла визирования горизонта.

Применение модели (6) при  $\varepsilon_{min} = \varepsilon_H$  обеспечивает существенно завышенные значения плотности вероятности сигналов РЭС-источников ЭМИ в точке наблюдения для углов визирования  $\varepsilon \geq (1,2 \dots 1,5) \varepsilon_H$  по сравнению с моделью (11).

Как и в предыдущем случае, приведенные соображения в силу дуализма рассматриваемой задачи справедливы и для "обратной" ситуации, когда в точке наблюдения над поверхностью земли размещается РЭС-источник ЭМИ, а в области потенциального мешающего взаимодействия радиуса  $R_{max} \leq R_H$  случайно равномерно располагаются РЭС-рецепторы помех, имеющие порог восприимчивости  $\Pi_{min}$ . Применительно к этой ситуации модели (6), (11) соответственно приближенно и точно описывают плотность распределения вероятностей угла визирования произвольно выбранного РЭС-рецептора помех по отношению к точке наблюдения, в которой расположен поднятый над поверхностью РЭС-источник ЭМИ.

## Заклучение

На основании изложенного можно сделать вывод, что в важном с практической точки зрения случае, характеризуемом близким к равномерному случайным распределением источников ЭМИ, равной ЭИИМ по земной поверхности, вид плотности распределения вероятностей этих сигналов по энергетическому параметру в точках над поверхностью соответствует модели (4) и инвариантен к кривизне земной поверхности и к высоте точки наблюдения над поверхностью. Доказано, что при условии (12) в качестве плотности распределения вероятности сигналов по углу визирования направления прихода в точку наблюдения над поверхностью может использоваться упрощенная модель (6), полученная без учета кривизны земной поверхности. Полученные результаты существенно расширяют возможности применения основных положений статистической теории ЭМС [1], обеспечивая возможность системного анализа электромагнитной совместимости РЭС, функционирующих над поверхностью Земли, по отношению к РЭС на ее поверхности

## PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT ABOVE GROUND LEVEL PRODUCED BY EARTH-BASED RADIO STATIONS

V.I. MORDACHEV

### Abstract

Results of modeling of power flux density and viewing angle probability distributions of radio signals generated by earth based radio stations and forming an electromagnetic environment above ground level on spatial points elevated on some altitude above the spherical ground surface are presented.

### Литература

1. *Апорович А.Ф.* Статистическая теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Минск, 1984.
2. *Мордачев В.И.* Статистические характеристики электромагнитной обстановки в рассредоточенных группировках РЭС. Научно-технический отчет инв. № 02880034534. Минск, 1987.
3. *Мордачев В.И.* // Тр. IX Междунар. Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости, июнь 1988 г. Вроцлав, 1988. С. 571–576.
4. *Мордачев В.И.* // Труды X Международного Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости, июнь 1990 г. Вроцлав, 1990. С. 409–414.
5. *Mordachev V.* // 15<sup>th</sup> Intern. Wroclaw Symp. on EMC. Poland, Wroclaw. June 27–30. 2000. P. 331–335.
6. *Mordachev V.* // The IEEE Semi Annual VTC Fall 2000. Boston, Sept. 24–28, 2000.
7. *Rappaport T.S.* Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.