

УДК 621.396.67

**ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ СИГНАЛА РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТ
НА РАДИОТРАССАХ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ОТ ПЕРЕДАТЧИКА
С АНТЕННОЙ “ДИПОЛЬ”**

© 2012 Н.А. Попов, М.М. Чернова, А.И. Макаев

Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Поступила в редакцию 29.06.2012

В статье рассматривается методика расчета пространственного распределения уровня сигнала на территории региона от передатчика декаметрового диапазона волн с заданными энергетическими характеристиками, работающего на антенну “диполь” на разных частотах связи. Полученные данные можно использовать на этапах планирования и организации КВ радиосвязи между пунктами управления воздушным движением и магистральными самолетами ГА, а также для улучшения радиосвязи путем формулирования рекомендаций и предложений по выбору передающих антенн, коррекции их характеристик диаграмм направленности, изменения мощности передатчиков и др. В качестве примера приводятся результаты расчета уровней электромагнитного поля (ЭМП) на территории Европейской части России от КВ передатчика, работающего на антенну “Диполь” из района Москвы.

Ключевые слова: уровень электромагнитного поля, антenna “Диполь”, радиотрасса многоскаковая, диапазон декаметровый, диаграмма направленности.

При организации и обеспечении радиосвязи в декаметровом диапазоне волн от пунктов управления воздушным движением с магистральными самолетами гражданской авиации, связи самолетов между собой и при обеспечении полетов по трассам, в которых временные разрывы в полях МВ-связи превышают заданные величины, определенный интерес представляет определение пространственного распределения уровней КВ сигнала на территории региона. Кроме того, представляет интерес расчет зон уверенного приема сигнала от КВ передатчика, работающего на одну антенну на разных частотах связи и определение зон, где связь с самолетами осуществить невозможно.

В настоящее время расчет линий КВ радиосвязи проводятся по методикам [2, 3, 4, 7 и др.], как правило, графоаналитическим методом, и лишь между двумя удаленными корреспондентами. Имеются данные об использовании ПЭВМ для автоматизации этих расчетов [7, 8], однако, при числе территориально рассредоточенных корреспондентов сети более 3...5, трудоемкость расчетов по ним резко возрастает. Кроме того, результаты расчетов, проведенные с использованием известных методик, не в полной мере учитывают характеристики диаграмм направленности передающей антенны и особенности распространения

радиоволн на различных частотах и имеют недостаточную наглядность представления результатов. Поэтому целью исследований, представленных в работе, явилось совершенствование существующих методик расчета линий КВ радиосвязи в направлении автоматизации расчетов по определению уровня сигнала на территории региона от передатчика с известными энергетическими характеристиками и заданной передающей антенной на нескольких частотах связи, отображения территориального распределения уровня сигнала на каждой из частот, а также графическое представление результатов расчета зон уверенного приема сигналов на карте региона.

Расчет напряженности электромагнитного поля E_c ионосферной волны на линии КВ радиосвязи производится с использованием автоматизированной методики расчета уровней ЭМП на территории региона для линий радиосвязи декаметрового диапазона, для средних широт, с использованием данных типовых радиопрогнозов и характеристик подстилающей поверхности, при заданных энергетических характеристиках передатчика, для нескольких частот связи и изменении характеристиках диаграмм направленности антенны для каждой из них. В основу расчетов положена формула [1, 2, 7]

$$E_c = \frac{\sqrt{30 \cdot k \cdot P_a \cdot G_t}}{r_s} \cdot |R(\theta)|^{n-1} \cdot e^{-\Gamma(\theta)} \cdot Dw(\theta) \cdot Dg(\alpha), \quad (1)$$

Формула (1) представляет собой произведение поля свободного пространства, создаваемого передатчиком мощностью P_a и антенной с коэффици-

Попов Николай Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолётостроение».

E-mail: popov-kaf11@yandex.ru

Чернова Мария Михайловна, студентка.

Макаев Александр Игоревич, студент.

E-mail: firefox73@yandex.ru

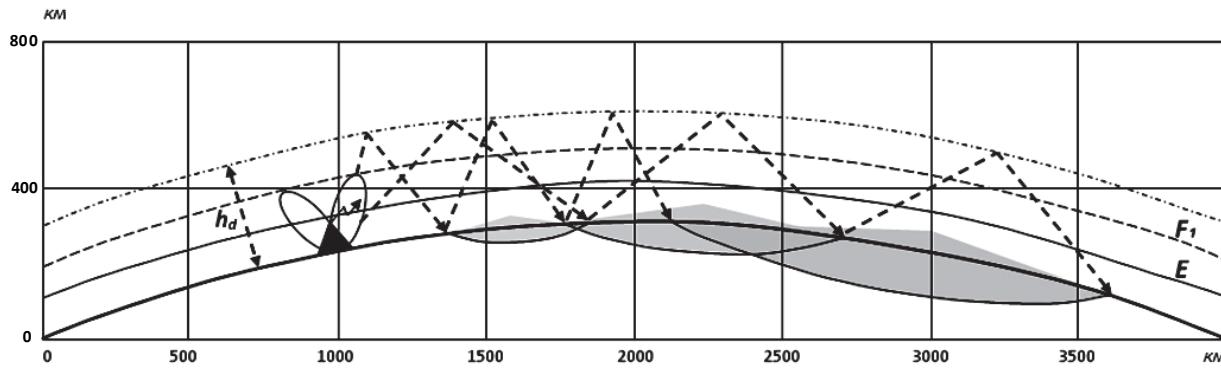


Рис. 1. Многоскачковая радиотрасса КВ радиосвязи при $n=3$

ентом усиления G_p , с дальностью распространения, равной длине луча ионосферной волны r_L односкачковой радиотрассы $n = 1$ на множители ослабления, определяемые через полный коэффициент поглощения $\Gamma(\theta)$, коэффициент отражения радиоволн от поверхности земли с заданными параметрами $|R(\theta)|$ и с учетом характеристик направленности используемых антенн в вертикальной и горизонтальной плоскости $Dw(\theta)$ и $Dg(\alpha)$. Учет потерь на магнито-ионное расщепление волн и поляризационное рассогласование осуществляется снижением мощности, подводимой к антенне P_a в четыре раза $k=0.25$.

В данном выражении модуль коэффициента отражения $|R(u)|$ при наклонном падении волны на границу раздела воздух – среда с потерями (влажная почва с $\epsilon' = 10$, $\sigma = 0,01 \text{ См}/\text{м}$) для значений длины волны $\lambda = 10, 50$ и 100 (м) рассчитан по [1, 2, 7] и показан на рис. 2.1. На рис. 2.2. показан пространственный коэффициент отражения $|R(u)|$ при падении волны на границу воздух – влажная почва с $\epsilon' = 10$, $\sigma = 0,01 \text{ См}/\text{м}$ для длины волны $\lambda = 50$ (м) в трехмерной системе координат.

Прохождение радиоволн через атмосферу сопровождается потерей части электромагнитной энергии волны через слои D и E и частично F_1 . Это характерно для волн КВ диапазона, отражающихся от слоя F_2 и дважды пересекающих нижележащие слои.

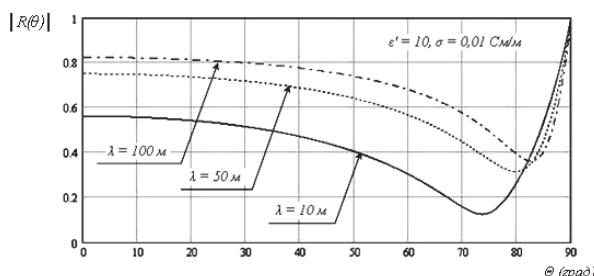


Рис. 2.1. Коэффициент отражения $|R(\theta)|$ при наклонном падении волны на границу раздела воздух – влажная почва с $\epsilon' = 10$, $\sigma = 0,01 \text{ См}/\text{м}$ для длин волн $\lambda = 10, 50$ и 100 (м)
в двухмерной системе координат

Общий интегральный коэффициент поглощения $\alpha = e^{-\Gamma}$ представляет собой сумму частных интегральных коэффициентов поглощения в слоях D , E , F_1 , через которые проходит волна, и в слое F_2 , от которого волна отражается.

Расчет полного коэффициента поглощения Γ в произведен по методу Казанцева. При отражении от слоя F_2 полный коэффициент поглощения Γ на частоте излучения передатчика f определяется по критическим частотам слоя $f_0 E$ выражения (2) [1, 2, 3]

$$\begin{aligned} \Gamma = & \frac{3 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos(\varphi_D)} + \frac{2,5 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos(\varphi_E)} + \\ & + \frac{0,4 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos(\varphi_{F1})} + 0,02 \cdot f^2 \cdot \cos^3(\varphi_{F2}) \end{aligned}, \quad (2)$$

где: φ_D , φ_E , φ_{F1} – углы наклонного падения волны на границу слоев D , E , $F1$, известные по результатам расчета θ ; $f_L \sim 1 \text{ МГц}$ – продольная составляющая гиромагнитной частоты.

График ослабления сигнала на КВ радиотрассе в зависимости от угла наклона траектории φ , частоты связи f и интегрального коэффициента поглощения в ионосфере $\alpha = e^{-\Gamma}$ имеет вид, показанный на рис. 3.1 и 3.2.

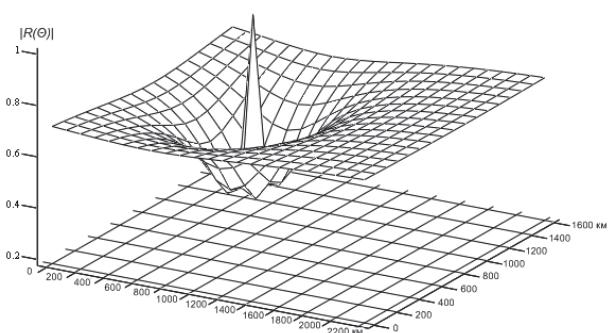


Рис. 2.2. Пространственный коэффициент отражения $|R(u)|$ при падении волны на границу воздух – влажная почва с $\epsilon' = 10$, $\sigma = 0,01 \text{ См}/\text{м}$ для длины волны $\lambda = 50$ (м) в трехмерной системе координат

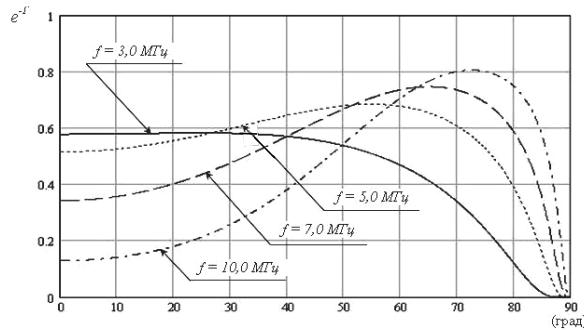


Рис. 3.1. Ослабление сигнала на КВ радиотрассе в зависимости от угла наклона траектории ϑ , частоты связи f и интегрального коэффициента поглощения в ионосфере $\alpha = e^{-r}$ в двухмерной системе координат

Совершенствование типовой методики расчета уровня напряженности ЭМП на территории региона проведено в следующих направлениях:

- оценка уровня ЭМП от передатчика производится на разных частотах связи, с антенной, имеющей соответствующие характеристики диаграмм направленности, на односкачковой радиотрассе $n = 1$ на всей территории региона;
- результаты расчета изображаются графиками в двухмерной и трехмерной системах координат, имеющими высокую наглядность представления результатов;
- уровни напряженности ЭМП на территории региона представляются с топографической картой как итоговый документ.

Реализуя цели исследований территории региона аппроксимируется прямоугольником, на котором с требуемым шагом дискретизации d_x (км) для всех точек региона i, j по формуле (1) проводится расчет напряженности поля E_{ij} от радиопередающего устройства. Передающее устройство “размещается” на ситуационном плане

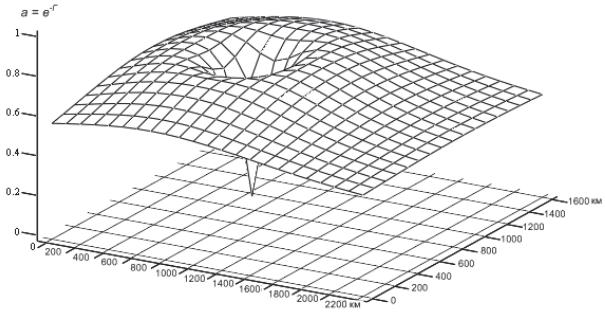


Рис. 3.2. Пространственное ослабление сигнала на частоте связи $f = 7 \text{ МГц}$ в зависимости от угла наклона траектории φ и интегрального коэффициента поглощения в ионосфере $\alpha = e^{-r}$ в трехмерной системе координат

региона с учетом его географического положения i_o, j_o . Для него задаются необходимые энергетические параметры и характеристики: тип антенны, частоты связи, диаграммы направленности антennы в вертикальной и горизонтальной плоскостях $Dw(\theta)$ и $Dg(\alpha)$ и указывается азимут максимума излучения.

Характеристики диаграмм направленности антennы $Dw(\theta)$ и $Dg(\alpha)$ могут задаваться либо массивами данных с последующим их сглаживанием методом кубических сплайнов, либо определяются расчетным путем [5, 6].

На рис. 4 показана принятая система представления данных для проведения расчетов.

С учетом сферичности земли угол падения волны на ионосферу φ_{ij} определяется выражением [1, 2]

$$\operatorname{tg}(\varphi_{ij}) = \frac{Z \cdot \sin(\psi_{ij})}{h_d + Z + Z \cdot \cos(\psi_{ij})},$$

в котором h_d – действующая высота отражения; Z – радиус земли в (км); $\psi_{ij} = d_{ij \text{ км}}/222,4$ - геоцентрический угол; $d_{ij \text{ км}}$ – протяженность радиотрассы.

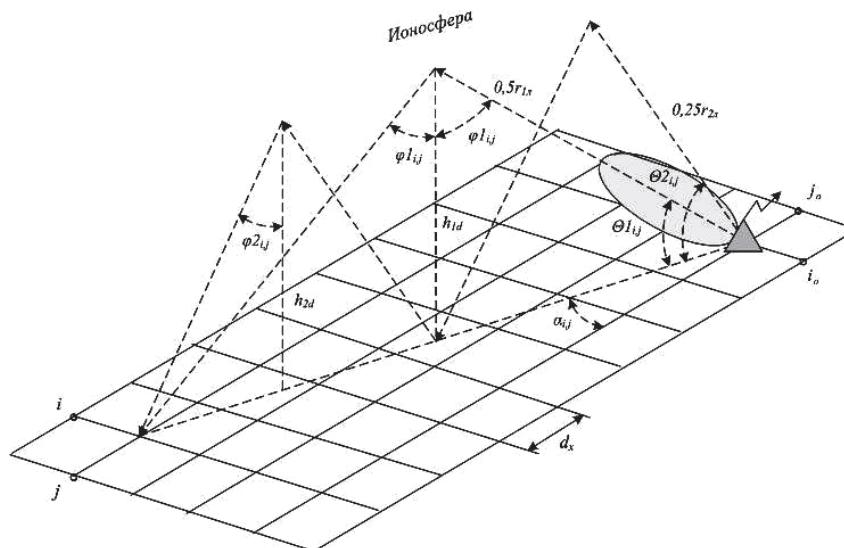


Рис. 4. Принятая система представления данных для проведения расчетов

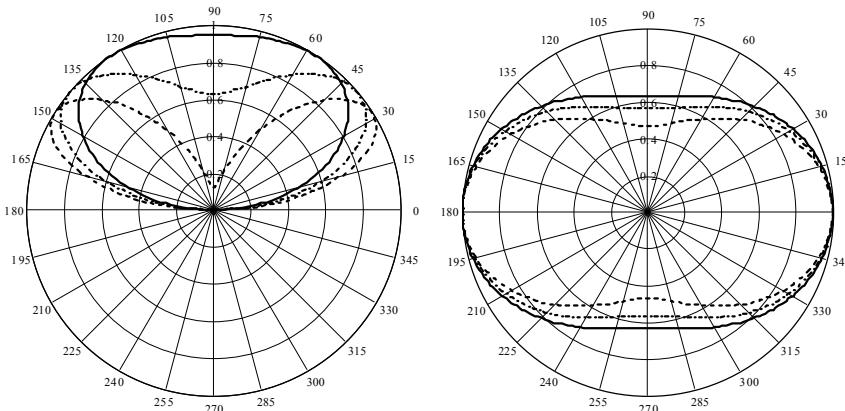


Рис. 5. Характеристики диаграмм направленности антенны “Диполь” в вертикальной и горизонтальной плоскостях на частоте связи $f = 5$ (сплошная линия), 7 (штрих-пунктирная) и 10 МГц (пунктирная линия)

Угол возвышения (или прихода волны) [1, 2, 3] определяется из выражения

$$\operatorname{tg}(\theta_{i,j}) = \frac{\cos(\psi_{i,j}) - \frac{Z}{Z + h_d}}{\sin(\psi_{i,j})}.$$

Для трассы из n скачков при определении геоцентрического угла расстояние берется в n раз меньше, т.е.

$$\psi_{i,j} = d_{i,j \text{ км}} / (222,4 \cdot n).$$

При протяженности трасс свыше 1000 км закон секанса требует учета сферичности Земли и ионосфера, что осуществляется поправочным коэффициентом k_s , произведение которого на $\sec(\varphi_{i,j})$ называют исправленным секансом

$$\sec(\varphi_{i,j})_{\text{испр}} = k_s \cdot \sec(\varphi_{i,j}).$$

В качестве примера использования автоматизированной методики проведения расчетов уровней ЭМП на территории региона рассмотрим расчет напряженности электромагнитного поля E_c при ионосферном односкачковом распространении радиоволн для системы КВ радиосвязи. Для получения картины напряженности ЭМП на радиотрассах до 3000 км размеры региона выбраны 2200×1600 км, шаг дискретизации

расчетов $dx = 100$ км. Мощность передатчика пункта управления воздушным движением полагаем равной $P_a = 1000$ Вт. В качестве передающей используется антenna “Диполь” $D2 \times 15$ с высотой подвеса $h = 14$ м. Характеристики диаграмм направленности (ХДН) антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях показаны на рис. 5. на частоте связи $f = 5$ МГц (сплошная линия), 7 МГц (штрих-пунктирная) и 10 МГц (пунктирная линия) (см. данные рис. 3.1).

На рис. 6.1 представлены результаты расчетов распределения уровня электромагнитного поля на частоте $f = 5$ МГц в двухмерной системе координат. Передатчик на плане региона имеет координаты $i_0 dx = 700$ км, $j_0 dx = 900$ км при шаге дискретизации $dx = 100$ км и работает на антенну “Диполь”, имеющую азимут максимума диаграммы направленности $A = 106^\circ$.

На рис. 6.2 те же данные представлены в трехмерной системе координат.

Из рисунков видно, что максимальные уровни сигнала на частоте связи $f = 7$ МГц при угле возвышения максимума характеристики диаграммы направленности (ХДН) антенны в вертикальной плоскости $x = 58^\circ$ удалены от передатчика на расстояния, примерно равные 300 км.

Территории региона, на которых уровень сигнала имеет значение, близкое к максимальному,

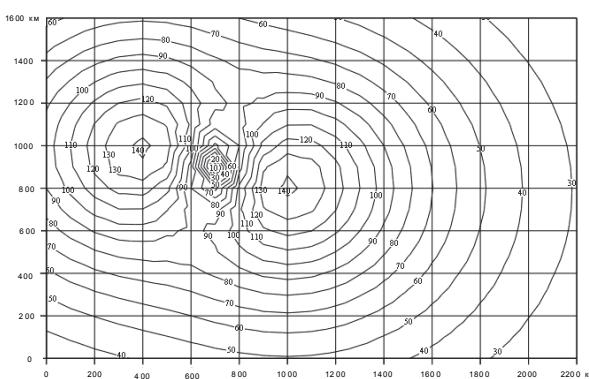


Рис. 6.1. Распределение уровня электромагнитного поля на $f = 5$ МГц от передатчика, работающего на антенну “Диполь” в двухмерной системе координат

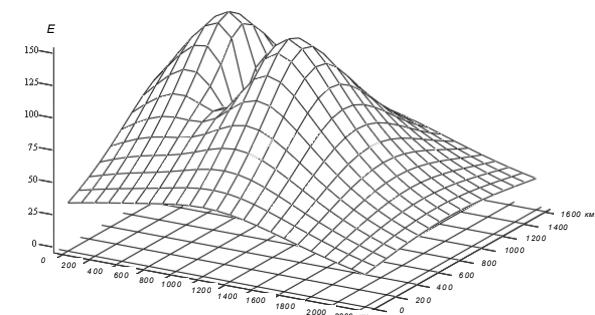


Рис. 6.2. Распределение уровня электромагнитного поля на $f = 5$ МГц в трехмерной системе координат

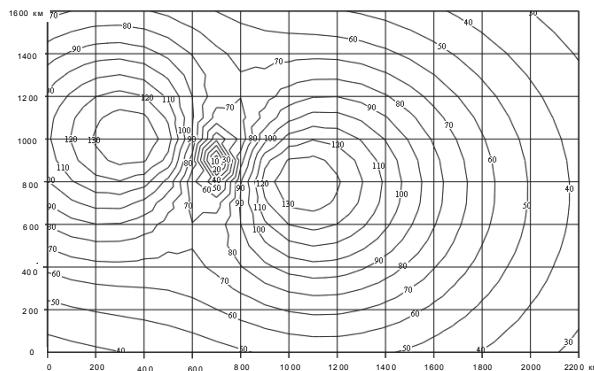


Рис. 7.1. Распределение уровня ЭМП на $f = 7 \text{ МГц}$ от передатчика, работающего на антенну “Диполь” в двухмерной системе координат

имеют форму неправильной окружности размером $250 \times 250 \text{ км}$. По рисунку можно определить зоны уверенного приема сигнала и зоны, в пределах которых прием первого луча невозможен.

На рис. 7.1 представлены аналогичные результаты расчетов уровня поля на $f = 7 \text{ МГц}$ в двухмерной, а на рис. 7.2 в трехмерной системе координат.

Из рисунков видно, что максимальные уровни сигнала на втором скачке удалены от передатчика на расстояния, примерно равные 400 км . Территории региона, на которых уровень сигнала близок к максимальному значению, имеют форму неправильной окружности размером $300 \times 300 \text{ км}$.

На рис. 8.1 и 8.2 представлены результаты расчетов распределения уровня электромагнитного поля на частоте $f = 10 \text{ МГц}$ радиотрассы в двухмерной и трехмерной системах координат.

Из рисунков видно, что максимальные уровни сигнала на частоте $f = 10 \text{ МГц}$ удалены от передатчика на расстояние, примерно равное 600 км . Территории региона, на которых уровень сигнала близок к максимальному значению, имеют форму неправильной окружности размером $400 \times 400 \text{ км}$.

Данные о напряженности электромагнитного поля на территории региона на различных частотах, представленные на рис. 6.1 – 8.2, име-

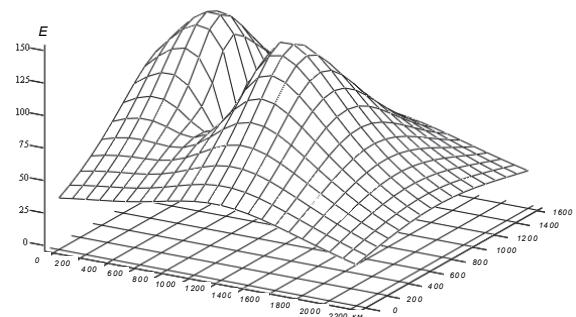


Рис. 7.2. Распределение уровня электромагнитного поля на $f = 7 \text{ МГц}$ в трехмерной системе координат

ют самостоятельный интерес, позволяющий оценить конфигурацию, размер и уровень сигнала для разных частот связи. Результаты расчетов, представленные в топографической системе координат, могут быть совмещены с картой региона и распечатаны как итоговый документ. Анализ таких рисунков позволяет оценить конфигурацию и размеры зон региона, в пределах которых прием сигнала возможен с требуемым качеством, в каких зонах прием еще возможен и выделить зоны отсутствия связи.

В качестве примера использования автоматизированной методики проведения расчета уровней ЭМП на рис. 9 показаны результаты территориального распределения уровней ЭМП на территории региона Европейской части России. Территория региона аппроксимируется прямоугольником размерами $2200 \times 1600 \text{ км}$ с шагом дискретизации $dx = 100 \text{ км}$.

Передатчик “размещен” в районе г. Москва, имеет мощность $P_a = 1000 \text{ Вт}$, расчет проведен для антенны “Диполь” $D2 \times 15$ с высотой подвеса $h = 14 \text{ м}$. Коэффициент усиления антенны определяется в соответствии с параметрами антенны для частоты $f = 7 \text{ МГц}$ и равен $G_r = 6 \text{ дБ}$, ослабление сигнала на радиотрассе проведено по типовым

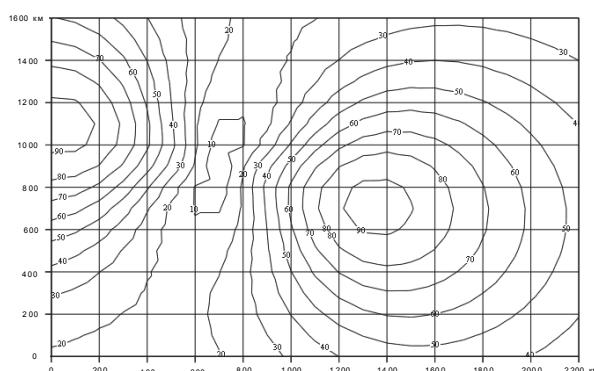


Рис. 8.1. Распределение уровня электромагнитного поля на частоте $f = 10 \text{ МГц}$ от передатчика, работающего на антенну “Диполь” в двухмерной системе координат

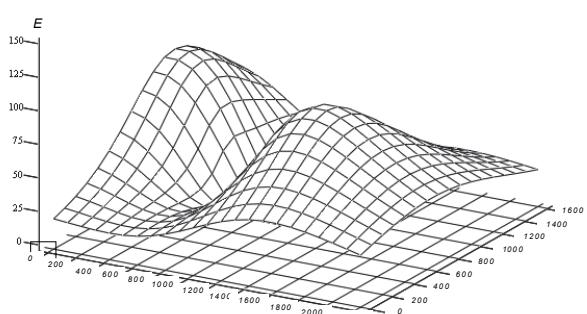


Рис. 8.2. Распределение уровня электромагнитного поля на частоте $f = 10 \text{ МГц}$ в трехмерной системе координат

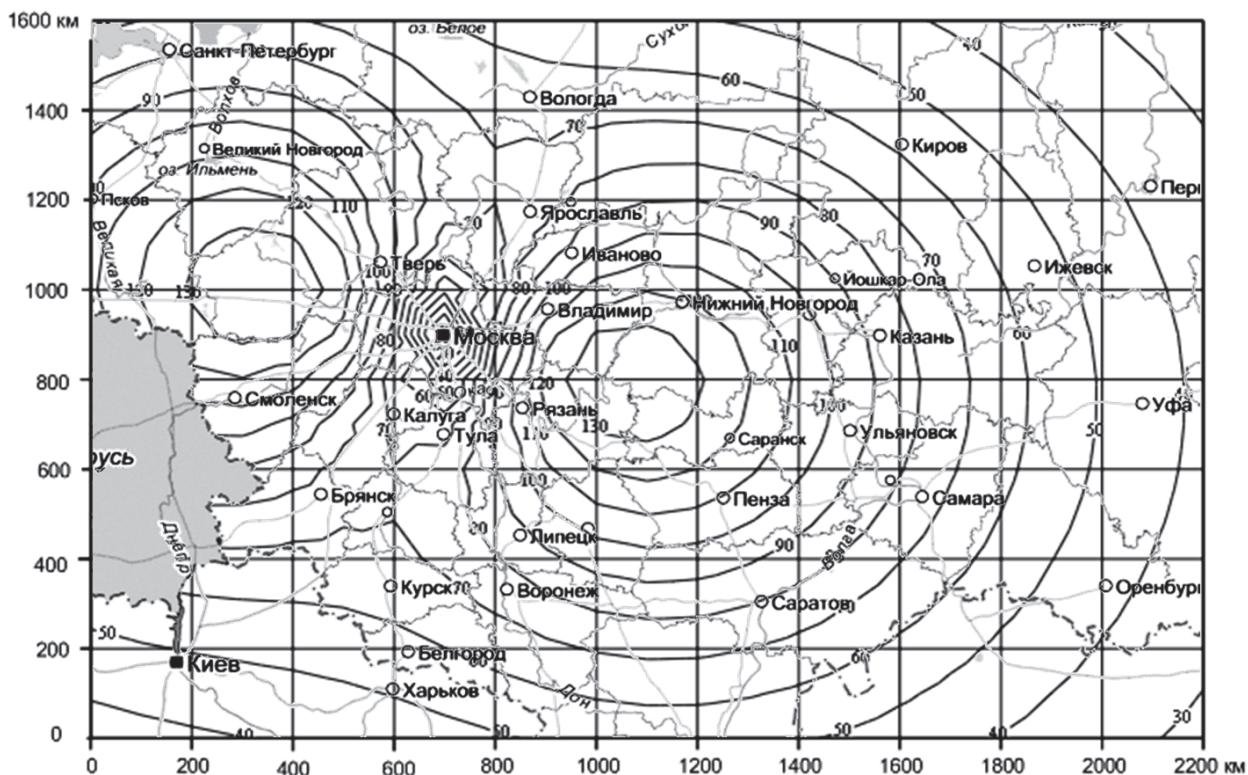


Рис. 9. Результаты расчета напряженности электромагнитного поля на территории региона от передатчика радиостанции средней мощности, работающего из района г. Москва на антенну “Диполь”

данным радиопрогнозов и параметрам подстилающей поверхности. Ионосфера полагается сферически однородной в пределах региона.

Рисунок получен совмещением данных результатов расчета напряженности поля на территории региона и карты этого региона соответствующего масштаба.

Из рисунка видно, что пространственная картина расположения максимумов напряженности электромагнитного поля для радиотрассы на территории региона имеет форму двух неправильных окружностей соответствующих характеристике диаграммы направленности антенны “Диполь” в горизонтальной плоскости. Максимумы напряженности поля расположены севернее 200 км г. Смоленск и южнее 20 км г. Нижний Новгород, удалены от радиопередающего устройства на расстояние, примерно равное 500 км и имеют размеры 350×400 км.

Разработанная методика позволяет провести расчеты для других радиопередающих устройств, произвольно размещенных на территории любого региона и работающих на любые типы антенн. Полученные данные о территориальном распределении уровней электромагнитного поля можно использовать на этапах планирования организации и обеспечения КВ радиосвязи между пунктами управления воздушным движением и магистральными самолетами ГА, а также для ее улучшения путем формулирования

рекомендаций и предложений по выбору лучших для связи антенн, коррекции их характеристик диаграмм направленности, изменения мощности передатчиков и др. Кроме того, по результатам расчетов можно определить те зоны региона, в пределах которых прием сигналов воздушными судами будет невозможен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Попов Н.А., Пятаков А.И. Расчет территориального распределения уровней сигнала на многоскаковых радиотрассах от КВ передатчика средней мощности с антенной “Диполь” //Автоматизация процессов управления. 2009. № 1 (15).
- Нарышкин Е.М., В.П. Серков В.П. Волновая служба и антенные устройства. Часть 1 Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн. М.: Воениздат, 1982. 288 с.
- Серков В.П., Слюсарев П.В. Расчет коротковолновых радиолиний. Л.: ВАС, 1977. 138 с.
- Серков В.П., Слюсарев П.В. Распространение радиоволн. Л.: ВАС, 1973. 254 с.
- Муравьев Ю.К. Антенные устройства для радиосвязи. Л.: ВАС, 1973. 324 с.
- Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М., Клигер Г.А., Кукрашов А.Г. Коротковолновые антенны [под. ред. Г.З. Айзенберга]. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
- Черенкова Е.Л., Чернышов О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
- Балинов В.В., Березин Ю.В., Полищук С.Е., Рыжов Д.Е. Зоны помехоустойчивого приема информации на ионосферных линиях радиосвязи при селективном возбуждении характеристических волн // Вестник

- Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1998. №1. С 4.
9. Гончарова Ю. Особенности моделирования распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона в волноводе земля-ионосфера. //Transport and Telecommunication. 2005.Vol.6. № 3.

**SPATIAL DISTRIBUTION DIFFERENT FREQUENCY SIGNAL'S INTENSITY
ON DECAMETER WAVELENGTH RANGE DIRECTIONS
FROM TRANSMITTER WITH ANTENNA "DIPOLE"**

© 2012 N.A. Popov, M.M. Chernova, A.I. Makaev

Institute of Aviation Technology and Management,
Ulyanovsk State Technical University

The article presents a method for calculating the spatial distribution signal intensity from the decameter wavelength range transmitter with set energy characteristics, operating at different radio communication frequencies to the antenna "dipole" in the region's territory. Transmitting antenna's orientation diagrams are frequency communication function. The findings can be used at the planning and organization stages of the SW radio communication between air traffic control centers and commercial aviation airplanes, as well as to improve radio communications by force of formulation recommendations and suggestions about selection of transmitting antennas, correction theirs orientation diagrams characteristics , changes the transmitter power, etc. As example presents results of calculation electromagnetic fields's (EMF) intensity on European part of Russia from the SW transmitter, operating to antenna "dipole" in Moscow.
Keywords: level of electromagnetic field, the antenna "Dipole", radio paths, decametric, radiation pattern.