УДК 621.396.67

ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ СИГНАЛА НА РАДИОТРАССАХ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ОТ ПЕРЕДАТЧИКА С АНТЕННОЙ "РОМБ"

© 2011 Н.А. Попов, Г.И. Данилов, О.Э. Чоракаев

Институт авиационных технологий и управления Ульяновского государственного технического университета

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье рассматривается методика расчета пространственного распределения уровня сигнала на территории региона от передатчика с заданными энергетическими характеристиками и диаграммами направленности передающих антенн. Полученные данные можно использовать на этапах планирования и организации дальней КВ радиосвязи между пунктами управления воздушным движением и магистральными самолетами ГА, а также для улучшения связи путем формулирования рекомендаций и предложений по выбору 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 и Урала от КВ передатчика, работающего на антенну "Ромб" из района Москвы.

Ключевые слова: уровни сигнала, радиотрассы, декаметровый диапазон волн, дальняя КВ радиосвязь, управление воздушным движением.

При организации и обеспечении дальней КВ радиосвязи от пунктов управления воздушным движением с магистральными самолетами ГА, связи самолетов между собой и при обеспечении полетов по трассам, в которых временные разрывы в полях МВ-связи превышают заданные величины, определенный интерес представляет решение задачи по определению пространственного распределения уровней сигнала на территории региона, планируемого для полетов. Кроме того, представляет интерес расчет зон уверенного приема сигнала от КВ передатчика, работающего на различные типы антенн и определение зон, где связь с самолетами осуществить невозможно.

В настоящее время расчет линий КВ радиосвязи проводятся по методикам [1, 2, 3, 4, 7 и др.], как правило, графоаналитическим методом, и лишь между двумя удаленными корреспондентами (рис. 1). Имеются данные об использовании ПЭВМ для автоматизации этих расчетов [7, 8], однако, при числе территориально рассредоточенных корреспондентов радиосети 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 антенн, не учитывают многоскачковое распространение радиоволн на радиотрассе и проблемы суперпозиции сигналов в точ-

Попов Николай Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение». Тел. (8422) 20-96-96. Данилов Георгий Иванович, аспирант. Чоракаев Олег Эдуардович, аспирант. ках приема, 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 для одно, двух и более скачковых радиотрасс, отображения уровня сигнала для каждого из скачков и их среднеквадратического значения, 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 и характеристиках диаграмм направленности антенн. В основу расчетов положена формула [1, 2, 7]

$$E_{c} = \frac{\sqrt{30 \cdot k \cdot P_{a} \cdot G_{I}}}{r_{\pi}} \cdot \left| R(\theta) \right|^{n-1} \times \\ \times e^{-\Gamma(\theta)} \cdot Dw(\theta) \cdot Dg(\alpha)$$
(1)

Формула (1) представляет собой произведение поля свободного пространства, создаваемо-



го передатчиком мощностью P_a и антенной с коэффициентом усиления G_i , с дальностью распространения, равной длине луча ионосферной волны r_n n – скачковой радиотрассы 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 магнитоионное расщепление волн и поляризационное рассогласование осуществляется снижением мощности, подводимой к антенне P_a в четыре раза k=0.25.

Для многоскачковой трассы множитель ослабления учитывается через модуль коэффициента отражения волны от земли $|R(\theta)|$ в степени, на единицу меньшую числа скачков *n*.

В данном выражении модуль коэффициента отражения $|R(\theta)|$ при наклонном падении волны на границу раздела воздух – среда с потерями (влажная почва с $\varepsilon' = 10$, $\sigma = 0,01$ см/м) для значений длины волны $\lambda = 10,50$ и 100 (м) рассчитан по [1, 2, 7] и показан на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Коэффициент отражения |*К*(*θ*)| при наклонном падении волны на границу раздела воздух – влажная почва с *ε* '=10, *σ* = 0,01 См/м для длин волны *λ* = 10, 50 и 100 (м) в двухмерной системе координат



Рис. 3. Пространственный коэффициент отражения |R(u)| при падении волны на границу воздух – влажная почва с ε '=10, σ = 0,01 См/м для длины волны λ = 50 (м) в трехмерной системе координат

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

Общий интегральный коэффициент поглощения $\alpha = e^{-r}$ представляет собой сумму частных интегральных коэффициентов поглощения в слоях *D*, *E*, *F*₄, 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]

$$\Gamma = \frac{3 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos(\varphi_D)} + \frac{2.5 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos(\varphi_E)} + \frac{0.4 \cdot (f_0 E)^2}{(f + f_L)^2 \cdot \cos(\varphi_{F1})} + 0.02 \cdot f^2 \cdot \cos^3(\varphi_{F2})$$
(2)

где $\varphi_D, \varphi_F, \varphi_{FI}$ – углы наклонного падения волны на границу слоев D, E FI, известные по результатам расчета $\theta; f_L \sim 1 M \Pi u$ – 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 $\alpha = e^{-r}$ имеет вид, показанный на рис. 4 и 5.

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



Рис. 4. Ослабление сигнала на КВ радиотрассе в зависимости от угла наклона траектории *φ*, частоты связи f и интегрального коэффициента поглощения в ионосфере *α* = e^{-г} в двухмерной системе координат



Рис. 5. Пространственное ослабление сигнала на частоте связи f= 5 МГц в зависимости от угла наклона траектории φ и интегрального коэффициента поглощения в ионосфере $\alpha = e^{-\Gamma}$ в трехмерной системе координат

- оценка уровня ЭМП от передатчика с антенной, имеющей заданные характеристики диаграммы направленности, на *n*-скачковой радиотрассе производится не в одной точке, а на всей территории региона;

 результаты расчета изображаются графиками в двухмерной и трехмерной системах координат, имеющих высокую наглядность представления результатов;

- уровни напряженности ЭМП на территории региона привязываются к топографической карте местности и представляются как итоговый документ.

С этой целью территория региона аппроксимируется прямоугольником, на котором с требуемым шагом дискретизации d_x (км) для всех точек региона *i*, *j* по формуле (1) для n – го скачка проводится расчет напряженности поля E_{ij} от радиопередающего устройства. Передающее устройство "размещается" на ситуационном плане региона с учетом его географического положения i_o , j_o . Для него задаются необходимые энергетические параметры и характеристики, а также тип антенны, ее диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях $Dw(\theta)$ и $Dg(\alpha)$ и указывается азимут максимума излучения.

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

На рис. 6 показана принятая система представления данных для проведения расчетов.

С учетом сферичности земли угол падения волны на ионосферу $\varphi_{_{ii}}$ определяется выражением [1,2]

$$tg(\varphi_{i,j}) = \frac{Z \cdot \sin(\psi_{i,j})}{h_d + Z + Z \cdot \cos(\psi_{i,j})}, \qquad (3)$$

в котором h_d-действующая высота отражения; Z-

радиус земли в (км); $\psi_{ij} = d_{ij \kappa w}/222,4$ – геоцентрический угол; $d_{ij \kappa w}$ – протяженность радиотрассы.

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

$$tg(\theta_{i,j}) = \frac{\cos(\psi_{i,j}) - \frac{Z}{Z + h_d}}{\sin(\psi_{i,j})}.$$
 (4)

Для трассы из *n* скачков при определении геоцентрического угла расстояние берется в n раз меньше, то есть

$$\Psi_{ii} = d_{ii \, \text{KM}} / (222, 4 \cdot n).$$
 (5)

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

$$sec(\varphi_{ij})_{ucnp} = k_s \cdot sec(\varphi_{ij}).$$
(6)

В качестве примера использования автоматизированной методики проведения расчетов уровней ЭМП на территории региона рассмотрим расчет напряженности электромагнитного поля Е. при ионосферном многоскачковом распространении радиоволн для системы КВ радиосвязи. Для получения картины напряженности ЭМП на многоскачковых радиотрассах до 3000 км размеры региона выбраны 5000×4000 км, шаг дискретизации расчетов $dx = 100 \, \kappa M$. Мощность передатчика пункта управления воздушным движением полагаем равной Pa = 1000 Bm, коэффициент усиления используемой антенны "Ромб РГ 70/6 1,25" G₁ = 18 дБ. Характеристики диаграмм направленности (ХДН) антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях на частоте связи $f = 6 M \Gamma u$ показаны на рис. 7.

Результаты расчетов представляются графически в двухмерной и трехмерной системах координат (графиками линий уровня и графика-



Рис. 6. Принятая система представления данных для проведения расчетов



Рис. 7. Характеристики диаграмм направленности антенны "Ромб" в вертикальной и горизонтальной плоскостях

ми трехмерной поверхности).

На рис. 8 представлены результаты расчетов распределения уровня электромагнитного поля на первом скачке многоскачковой радиотрассы в топографической (двухмерной) системе координат. Передатчик на плане региона имеет координаты $i_0 = 40, j_0 = 20$ при шаге дискретизации $dx = 100 \ \text{км}$ и работает на антенну "Ромб", имеющую азимут максимума диаграммы направленности $A = 270^\circ$ (азимут на корреспондента и принятые в системе MathCAD направления отсчета углов не совпадают).

На рис. 9 те же данные представлены в трехмерной системе координат.

Из рисунков видно, что максимальный уровень сигнала на первом скачке при угле возвышения максимума характеристики диаграммы направленности (ХДН) антенны в вертикальной плоскости $\Theta = 30^{\circ}$ удален от передатчика на расстояние, примерно равное 1000 км.

Территория региона, на которой уровень сигнала имеет значение, близкое к максимальному, имеет форму неправильной окружности размером 250 × 250 км. На рисунке наглядно представлены зоны уверенного приема сигнала и зоны, в пределах которых прием первого луча невозможен.

На рис. 10 представлены аналогичные результаты расчетов уровня поля на втором скачке радиотрассы в двухмерной, а на рис. 11 в трехмерной системе координат.

Из рисунков видно, что максимальный уровень сигнала на втором скачке удален от передатчика на расстояние, примерно равное 2000 км. Территория региона, на которой уровень сигнала близок к максимальному значению, имеет форму



Рис. 8. Распределение уровня электромагнитного поля на первом скачке многоскачковой радиотрассы от передатчика, работающего на антенну "Ромб" в двухмерной системе координат



Рис. 9. Распределение уровня электромагнитного поля на первом скачке многоскачковой радиотрассы в трехмерной системе координат



Рис. 10. Распределение уровня ЭМП на втором скачке многоскачковой радиотрассы от передатчика, работающего на антенну "Ромб" в двухмерной системе координат

неправильной окружности размером 500 × 600 км.

На рис. 12 и 13 представлены результаты расчетов распределения уровня электромагнитного поля вблизи поверхности земли на третьем скачке многоскачковой радиотрассы в двухмерной и трехмерной системах координат.

Из рисунков видно, что максимальный уровень сигнала на третьем скачке удален от передатчика на расстояние, примерно равное 3000 км. Территория региона, на которой уровень сигнала близок к максимальному значению, имеет форму неправильной полуокружности размером 600 × 800 км.

Данные о напряженности электромагнитного поля на территории региона от первого, второго и третьего скачков, представленные на рис. 8 – 13, имеют самостоятельный интерес, позволяющий оценить конфигурацию, размер и уровень сигнала в этих зонах, спрогнозировать оценку вида и степени замираний сигналов в их совместной зоне и ряд других. Вместе с тем, определенный интерес представляет характеристика территориального распределения уровня



Рис. 11. Распределение уровня электромагнитного поля на втором скачке многоскачковой радиотрассы в трехмерной системе коотдинат



Рис. 12. Распределение уровня электромагнитного поля на третьем скачке многоскачковой радиотрассы от передатчика, работающего на антенну "Ромб" в топографической системе координат

сигнала, представляющая собой суперпозицию всех лучей. На рис. 14 в двухмерной системе координат представлены результаты расчета распределения среднеквадратического уровня электромагнитного поля от первого, второго и третьего скачков для передатчика, работающего на антенну "Ромб", а на рис. 15 – те же результаты в трехмерной системе координат.

Анализ этих 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.

Результаты расчетов уровня электромагнитно-

го поля, представленные в топографической системе координат, могут быть совмещены с картой региона и распечатаны как итоговый документ.

В качестве примера использования автоматизированной методики проведения расчета уровней ЭМП на территории региона для КВ радиосвязи на рис. 16 показаны результаты расчета территориального распределения уровней ЭМП для трехскачкового (n=3) распространения радиоволн на территории региона Европейской части России и Урала. Территория региона аппроксимируется прямоугольником размерами 3200 × 2400 км с шагом дискретизации dx = 100 км.

Передатчик "размещен" в районе г. Москва,



Рис. 13. Распределение уровня электромагнитного поля на третьем скачке многоскачковой радиотрассы в трехмерной системе координат



Рис. 14. Распределение уровня электромагнитного поля от первого, второго и третьего скачков на многоскачковой радиотрассе от передатчика, работающего на антенну "Ромб" в топографической системе координат



Рис. 15. Распределение уровня электромагнитного поля трех скачков на многоскачковой радиотрассе в трехмерной системе координат



Рис. 16. Результаты расчета напряженности электромагнитного поля многоскачкового распространения радиоволн на территории региона от передатчика радиостанции средней мощности, работающего из района г. Москва на антенну "Ромб"

имеет мощность Pa=1000 Вт, расчет проведен для антенны "Ромб РГ 70/6 1,25", технический диапазон частот определен в соответствии с параметрами антенны, ослабление сигнала на радиотрассе проведено по типовым данным радиопрогнозов и параметрам подстилающей поверхности.

Ионосфера полагается сферически однородной средой в горизонтальном направлении.

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 искаженных эллипсов и соответствует характеристике диаграммы направленности антенны "Ромб РГ 70/6 1,25" в горизонтальной плоскости. Главный максимум напряженности поля расположен в районе г. Сарапул, удален от радиопередающего устройства на расстояние, примерно равное 1000 км и имеет размеры 250 × 300 км. На рисунке отчетливо просматривается "мёртвая зона" распространения радиоволн и зоны, в пределах которых прием сигнала невозможен.

Разработанная методика позволяет провести аналогичные расчеты для других радиопередающих устройств, произвольно размещенных на территории любого региона и работающих на разные типы антенн. Полученные данные о территориальном распределении уровней электромагнитного поля можно использовать на этапах планирования организации и обеспечения дальней 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.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

- Попов Н.А., Пятаков А.И. Расчет территориального распределения уровней сигнала на многоскачковых радиотрассах от КВ передатчика средней мощности с антенной "Ромб". // Автоматизация процессов управления. 2009. № 1 (15).
- Нарышкин Е.М., В.П.Серков В.П. Волновая служба и антенные устройства. Ч. 1. Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн. М.: Воениздат, 1982. 288 с.
- 3. Серков В.П., Слюсарев П.В. Расчет коротковолновых радиолиний. Л.: ВАС, 1977. 138 с.
- 4. Серков В.П., Слюсарев П.В. Распространение радиоволн. Л.: ВАС, 1973. 254 с.
- 5. *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.
- 7. *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 Telecjmmunication, Vol.6, № 3, 2005.

TERRITORIAL DISTRIBUTION OF RADIO SHORT-WAVE FREQUENCIES SIGNAL FROM THE TRANSMITTER WITH "RHOMBUS" AERIAL

© 2011 N.A. Popov, G.I. Danilov, O.E. Chorakaev

Institute of Aviation Technologies and Management, Ulyanovsk State Technical University

The design procedure of spatial distribution of level of a signal on territory from the transmitter with set power characteristics and diagrams transferring aerials orientation (antenna) is considered in the article. The obtained data can be used at the planning stage and while organizating distant ionospheric radio communication between air traffic control points and long range civil aircraft, and also for communication (level) improvement by giving recommendations and offers for choice of aerials, correction of orientation diagrams characteristics, transmitters capacity changes, etc. The results of calculation of levels of electromagnetic fields of short-wave frequencies transmitter working with "Rhombus" aerial from Moscow area to European part of Russia and the Ural Mountains are given as an example.

Key words: level of a signal, radio short-wave frequencies signal, distant ionospheric radio communication, air traffic control points.

Nikolay Popov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Construction Department. Tel. (8422) 20-96-96. George Danilov, Graduate Student. Oleg Chorakaev, Graduate Student.