



УДК 621.371.34

С. А. Беляев, А. В. Экало

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Е. А. Рубцов, С. А. Кудряков

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

Методика оценки зон действия радиотехнических систем гражданской авиации при выборе позиций их размещения

Представлена методика оценки зон действия радиотехнических систем гражданской авиации, позволяющая учесть влияние рельефа местности и параметров атмосферы рассматриваемого региона. Применение цифровой модели рельефа SRTM позволяет оценить углы закрытия для выбранной позиции без необходимости проведения выездных работ для теодолитной съемки углов закрытия непосредственно на местности. На контрольном примере для радиолокатора 1Л118 показана хорошая сходимость результатов моделирования и прямых измерений. Параметры атмосферы оцениваются по данным многолетних наблюдений, приведенным в аэроклиматических справочниках. Проведение расчетов возможно по усредненным показателям или показателям наихудшего месяца. Рассматриваемая методика может применяться при выборе оптимальных позиций размещения радиолокационных станций, систем ближней навигации VOR/DME, наземных станций автоматического зависимого наблюдения, а также радиотехнических систем связи ОВЧ-диапазона для обеспечения существующих, а также перспективных требований безопасности полетов.

Зона действия, угол закрытия, цифровая модель рельефа, SRTM, позиция размещения радиотехнических систем, безопасность полетов

Развитие гражданской авиации (ГА) требует постоянного совершенствования наземной инфраструктуры радиотехнических систем (РТС) навигации, наблюдения и связи. Важной задачей при этом является выбор оптимальных позиций размещения для обеспечения требований по перекрытию воздушных трасс и контролируемого воздушного пространства в целом зонами действия. Традиционно применяемые методы не позволяют учесть влияние рельефа местности и параметров атмосферы данного региона. В статье предлагается методика расчета зон действия, учитывающая перечисленные факторы.

Большинство РТС гражданской авиации работает в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ. Максимальная дальность действия для данных диапазонов ограничена наличием естественных и искусственных закрытий, параметрами атмосферы и высотой полета воздушного судна (ВС). Одной из важнейших характеристик РТС является зона

действия (ЗД), представляющая собой область пространства, в пределах которой возможно получение требуемой радионавигационной информации или информации РТС наблюдения. Для радиотехнических систем связи ЗД определяется областью пространства, в пределах которой обеспечивается устойчивый двухсторонний радиообмен; в зарубежной литературе для обозначения зон действия применяют термин *coverage* [1].

На предприятиях ГА размер зон действия РТС определяют расчетным методом, с последующей корректировкой по результатам облетов при вводе в эксплуатацию (для ряда РТС разработана процедура периодических облетов). Данный подход имеет ряд недостатков. Для экономии средств время облета, количество эшелонов и направлений пролета РТС сводится к минимуму, что приводит к довольно большим погрешностям для направлений и высот полета, отличающихся от облетных. Концепция зональной навигации тре-

бует определения максимальной дальности действия РТС для всех азимутальных направлений и для всех высот. Решать проблему за счет расширения программы облетов нецелесообразно по экономическим соображениям: необходимо внедрять в производство новые расчетные методы [2], [3].

При анализе потенциальных позиций размещения РТС применяются упрощенные методики расчета ЗД, которые не учитывают влияние закрытий и параметры атмосферы данного региона, поэтому обладают относительно невысокой точностью. Полученные результаты могут не показать наличия существующих в реальности разрывов в радиолокационном, радионавигационном и радиосвязном полях, что негативно скажется на безопасности полетов.

Анализ существующих методов расчета зон действия. В настоящее время при оценке зон действия применяют метод расчета прямой радиовидимости, а также метод определения напряженности поля в точке приема.

Самым простым методом расчета зон действия является метод определения прямой радиовидимости, который имеет довольно большую погрешность из-за того, что не учитывает влияние рельефа и нелинейность параметров атмосферы. Несмотря на это, метод широко применяется для примерной оценки степени перекрытия контролируемого воздушного пространства полями РТС [3], [4].

Для оценки уровня напряженности поля в точке приема широко применяется рекомендация МСЭ-Т (Международного союза электросвязи и телеграфии) Р.528-3. Рекомендация содержит данные о потерях при распространении радиоволн диапазонов ОВЧ, УВЧ и СВЧ. Данные представлены в виде кривых распространения радиоволн для 5, 50 и 95 % времени, а также в виде таблиц. Кривые построены для умеренного континентального климата. Земля принимается сферической и ровной, фактор эффективного радиуса Земли $k = 4/3$ (рефракция в поверхностном слое $N_s = 301$). В расчетах применялась компенсация чрезмерного искривления луча на больших высотах, связанная с принятым значением эффективного радиуса Земли. Параметры рельефа, электрические характеристики почвы, профиль атмосферы и характеристики антенны не учитывались [5].

С помощью приведенных в рекомендации МСЭ-Т Р.528-3 графиков и таблиц можно рассчитать потери при распространении радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и

СВЧ (в рекомендации приведены данные для частот: 125, 300, 1200, 5100, 9400 и 15 500 МГц). Потери рассчитываются для пары антенн, одна из которых может иметь высоту h_1 от 1.5 до 20 000 м (как правило, это антенна, установленная на земле или на воздушном судне), вторая – высоту h_2 , равную 1000, 10 000 либо 20 000 м (антенна, установленная на воздушном судне). Пример графика кривых распространения на частоте 125 МГц для 1 % времени и высоты антенны $h_2 = 1000$ м представлен на рис. 1, где по оси абсцисс откладывается расстояние между антеннами в километрах, а по оси ординат – потери передачи в децибелах [5]. Кривая 1 на рис. 1 соответствует расчету для свободного пространства. Кривые 2–6 соответствуют различным вариантам высот антенны h_1 : кривая 2 – $h_1 = 1.5$ м, кривая 3 – $h_1 = 15$ м, кривая 4 – $h_1 = 30$ м, кривая 5 – $h_1 = 60$ м, кривая 6 – $h_1 = 1000$ м.

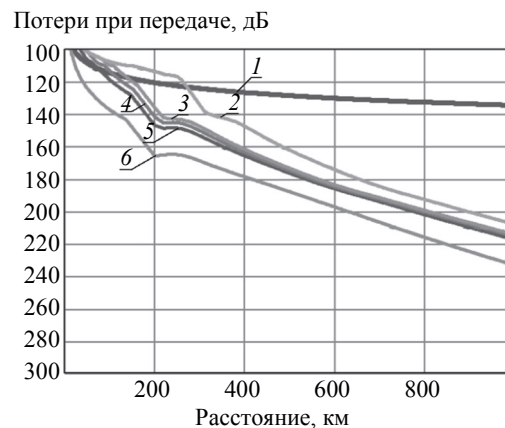


Рис. 1

Ожидаемый коэффициент защиты (отношение полезного сигнала к мешающему, превышаемое на входе в приемник в течение по крайней мере 95 %), рассчитывается с помощью кривых распространения по следующим формулам [5]:

$$R(0.95) = R(0.50) + Y_R(0.95);$$

$$R(0.50) = P_t + G_t + G_r - L_b(0.50);$$

$$Y_R = - \left([L_b(0.95) - L_b(0.50)]_{\text{Wanted}}^2 + [L_b(0.05) - L_b(0.50)]_{\text{Unwanted}}^2 \right)^{1/2},$$

где $R(0.95)$, $R(0.50)$ – ожидаемые коэффициенты защиты для 95 и 50 % времени; P_t – мощность передатчика; G_t , G_r – коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн; $L_b(0.95)$, $L_b(0.50)$, $L_b(0.05)$ – потери передачи для 95, 50 и 5 % времени.

Из полученного коэффициента защиты можно оценить напряженность поля в точке приема для последующего сравнения с требуемым значением. Для аналоговой радиосвязи ОВЧ-диапазона напряженность поля в точке расположения бортовой антенны должна быть не менее 75 мкВ/м [6]. Удаление, на котором напряженность поля в точке приема равняется требуемой, и будет границей зоны действия.

Методика расчета зоны действия с учетом влияния закрытий и параметров атмосферы. Рассмотрим предлагаемую методику расчета зон действия и оценим способы учета тех или иных параметров. Для учета влияния закрытий необходимо определить углы закрытия β_3 для каждого угла азимута. Максимальная дальность действия [1], [3]:

$$D_3 = \sqrt{\left(\frac{16\,900 \operatorname{tg} \beta_3}{2}\right)^2 + 16.9(H_{\text{эш}} + h_{\text{ант}})} - \frac{16\,900 \operatorname{tg} \beta_3}{2},$$

где $H_{\text{эш}}$ – высота эшелона (высота полета воздушного судна); $h_{\text{ант}}$ – высота поднятия наземной антенны.

Для измерения углов закрытия в службах эксплуатации радиотехнического оборудования и связи применяют теодолит либо пользуются услугами представителей специальных организаций. Результаты измерений оформляются в виде таблиц и графиков углов закрытий, которые входят в состав документации таких средств, как радиолокаторы и навигационные системы VOR/DME. Для ряда средств определение углов закрытия не предусмотрено существующей документацией. К таким средствам относятся наземные станции автоматического зависимого наблюдения, а также средства связи ОВЧ-диапазона. В связи с этим необходимо рассчитать углы закрытия для потенциальных позиций РТС всех видов, чтобы обосновать оптимальный вариант их состава и размещения. Съемка углов закрытия с помощью теодолита – трудоемкий и затратный процесс, откуда следует вывод о необходимости разработки альтернативных способов съемки.

Для расчета углов закрытия пользуются профилями местности, снятыми для различных азимутальных углов. Получить данные о высотах рельефа можно с помощью топографических карт, а также цифровых моделей рельефа [2], [3].

Традиционно профиль местности снимался по топографическим картам (подробно методику

работы по построению графика углов закрытия можно найти в [7]). Недостатки способа – большая трудоемкость и отсутствие автоматизации. Преимущества заключаются в том, что карты хорошего качества можно найти в свободном доступе, информация о высотах рельефа достоверна, а профиль можно снять с карты вручную.

При использовании цифровых моделей рельефа можно обратиться к базам данных, находящимся в свободном доступе: GTOPO, SRTM, ASTER GDEM [2], [3].

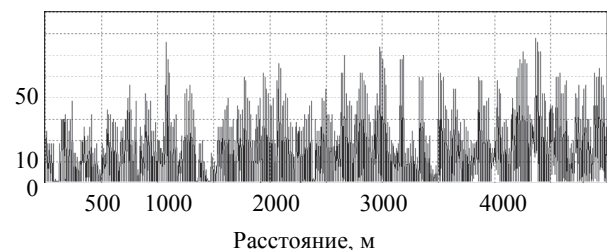
База GTOPO содержит данные с разрешением в 30 арксекунд (примерно 1 км); разработчик – United States Geological Survey (USGS). Файлы распространяются в формате USGS DEM.

База SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) содержит данные о рельефе с разрешением 3 арксекунды. Данные предоставляются в виде файлов формата HGT. Каждый файл содержит информации о рельефе в пределах одного градуса и представляет собой матрицу размером 1201×1201 .

Эти две базы используются в различных геоинформационных системах (ГИС), например Google Earth.

База ASTER GDEM предлагает данные о рельефе в формате DEM с разрешением в одну арксекунду. Каждый файл представляет собой матрицу размером 3601×3601 . Эти данные, в отличие от SRTM, не проходили обработку, а потому содержат большое количество шума. На рис. 2 представлен профиль местности, снятый с помощью ASTER, а на рис. 3 – с помощью SRTM. Анализ графиков показывает, что применение ASTER GDEM в настоящем виде затруднено [2], [3].

Высота, м



Расстояние, м
Рис. 2

Высота, м



Расстояние, м
Рис. 3

Таблица 1

α	φ
A_1	B_1
$A_1 + 0.5\Delta A_1$	$B_1 + 0.5\Delta B_1$
$A_1 + 0.25(\Delta A_1 + \Delta A_2)$	$B_1 + 0.25(\Delta B_1 + \Delta B_2)$
$A_1 - \Delta A_2 + 2\Delta A_3$	$B_1 - \Delta B_2 + 2\Delta B_3$
$A_1 + 1/27(7\Delta A_1 + 10\Delta A_2 + \Delta A_3)$	$B_1 + 1/27(7\Delta B_1 + 10\Delta B_2 + \Delta B_3)$
$A_1 + 1/625(28\Delta A_1 - 125\Delta A_2 + 546\Delta A_3 + 54\Delta A_4 - 378\Delta A_5)$	$B_1 + 1/625(28\Delta B_1 - 125\Delta B_2 + 546\Delta B_3 + 54\Delta B_4 - 378\Delta B_5)$

Применение цифровых моделей рельефа для определения углов закрытия позволяет снимать профили местности с шагом в 1° . Для этих целей на кафедре «Радиоэлектронные системы» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации была разработана компьютерная программа, позволяющая получать профили местности и рассчитывать углы закрытия для заданной позиции размещения РТС и заданной высоты фазового центра антенны.

В программе профили местности строятся в виде лучей, расходящихся от точки расположения антенны. Для получения профиля местности в программе происходит циклическое решение прямой геодезической задачи: по заданному азимуту и удалению от заданной точки необходимо определить координаты второй точки [2], [3]:

$$\begin{cases} B_2 - B_1 = \int_0^S \frac{V^3}{C} \cos A \, dS, \\ L_2 - L_1 = \int_0^S \frac{V}{C} \sec B \sin A \, dS, \\ A_2 - A_1 \pm 180^\circ = \int_0^S \frac{V}{C} \sin B \sec B \sin A \, dS, \end{cases}$$

где B_1, B_2 – широты первой и второй точек; L_1, L_2 – долготы первой и второй точек; A_1, A_2 – прямой и обратный азимуты; V – вторая функция геодезической широты; C – радиус кривизны меридиана.

Имеем:

$$\begin{cases} B_2 = B_1 + \frac{1}{6}(\Delta B_1 + 4\Delta B_3 + \Delta B_4), \\ L_2 = L_1 + \frac{1}{6}(\Delta L_1 + 4\Delta L_3 + \Delta L_4), \\ A_2 = A_1 + \frac{1}{6}(\Delta A_1 + 4\Delta A_3 + \Delta A_4), \end{cases}$$

где $\Delta B_i = S_0 V_i^3 \cos \alpha_i$; $\Delta L_i = S_0 V_i \frac{\sin \alpha_i}{\cos \varphi_i}$; $\Delta A_i = \Delta L_i \sin \varphi_i$; $V_i = (1 + 0.6\gamma_i)/(1 + 0.2\gamma_i)$; $\gamma_i = b \times \cos 2\varphi_i$; $S_0 = 0.0322304S$; $\beta = 1.25e^2$; $i = 1 \dots 6$ – номер шага.

Значения коэффициентов α_i и φ_i для решения прямой геодезической задачи приведены в табл. 1 [2], [3].

Для решения прямой геодезической задачи в разработанной программе применяется метод Рунге–Кутты четвертого порядка точности. Для инженерных расчетов можно использовать менее точные методы, однако, как показал эксперимент, это существенно влияет на быстродействие программы.

Построение профиля – наиболее трудоемкая задача. Рассмотрим алгоритм ее решения:

1. По координатам первой точки, заданному азимуту и удалению определяется координата второй точки (в рамках решения прямой геодезической задачи).

2. Для полученной координаты второй точки из матрицы цифровой модели рельефа находится ее высота.

3. Найденная точка принимается за первую, и происходит переход в начало алгоритма.

Таким образом, строится профиль местности для заданного угла азимута. Шаг по горизонтали фиксирован и составляет 50 м. Профиль строится до максимального удаления от антенны, равного 50 км. Далее происходит переход к следующему азимутальному направлению. После того как получены профили для всех углов азимута, рассчитываются углы закрытия [2], [3]:

$$\beta_{3i} = \arctg \left(\frac{h_{\text{rel } i} - \frac{R^2}{16.9} - h_{\text{ант}}}{R} \right),$$

где β_{3i} – угол закрытия для заданной точки профиля; $h_{\text{rel } i}$ – высота точки профиля; $h_{\text{ант}}$ – высота антенны; R – удаление точки профиля от точки расположения антенны.

Угол закрытия определяется для каждой точки профиля, а затем выбирается наибольший из них, который и будет углом закрытия на данном азимутальном направлении. Результаты расчетов записываются в массив, а также могут быть представлены в виде графика углов закрытия [2], [3].

Для проверки точности расчетов использовался контрольный пример. Результаты моделирования сравнивались с теодолитной съемкой радиолокационной станции 1Л118, расположенной на аэродроме Кемь (рис. 4 и 5). На рис. 4 по-

казан график углов закрытия радиолокационной станции, полученный теодолитной съемкой, на рис. 5 – график углов закрытия, полученный с применением цифровой модели рельефа. Видно, что в целом результаты имеют хорошую сходимость [2], [3].

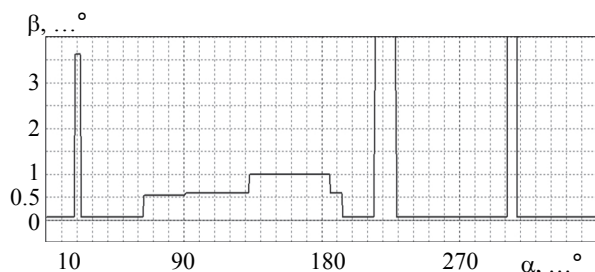


Рис. 4

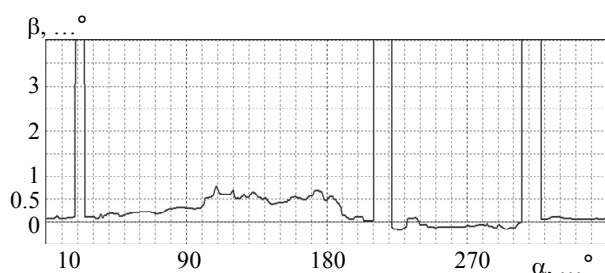


Рис. 5

На рис. 4 присутствуют закрытия прямоугольной формы от близкорасположенных эстакад вторичных радиолокаторов. Цифровая модель рельефа SRTM из-за ограничений по разрешающей способности эти объекты не распознает. Для учета точечных закрытий необходимо решить обратную геодезическую задачу, предварительно проанализировав территорию, окружающую антенну. При решении обратной геометрической задачи целесообразно применять упрощенный метод Винсенти [8].

Для учета влияния параметров атмосферы в расчетных формулах используют индекс рефракции, а также значение эквивалентного радиуса Земли и его производные. Исходя из параметров стандартной атмосферы (коэффициента рефракции $k = 4/3$), значение эквивалентного радиуса равняется 8450 км. При наличии параметров реальной атмосферы эквивалентный радиус [1]:

$$a_{\text{эк}} = \frac{a_0}{1 + a_0 \frac{dN}{dh} 10^{-5}},$$

где $a_0 = 6370$ км – фактический радиус Земли; dN/dh – градиент индекса преломления атмосферы.

Значение эквивалентного радиуса $a_{\text{эк}} = 8450$ км получено исходя из того, что градиент индекса преломления dN/dh принимается неизменным и равным -0.04 м^{-1} . Эти значения принято считать средними, их используют для предварительной оценки дальности действия РТС [3], [4].

В реальной атмосфере изменения индекса преломления носят нелинейный характер и зависят от температуры, плотности воздуха и давления водяных паров. Усредненные параметры атмосферы содержатся в аэроклиматических справочниках [9]. Индекс рефракции [1]:

$$N = \frac{77.6p}{T} - \frac{5.6p}{T} + \frac{3.75 \cdot 10^5 e}{T^2},$$

где p – давление воздуха; T – температура воздуха; e – давление водяных паров.

Используемые в формулах значения эквивалентного радиуса Земли и индекса рефракции находятся при сопоставлении параметров атмосферы в приземном слое и на высоте в 1000 м. Проведение расчетов возможно по усредненным показателям или показателям наихудшего месяца. Так, для Санкт-Петербурга значения эквивалентного радиуса равны:

- а) среднегодовое: $a_{\text{эк}} = 8338$ км;
- б) для наихудшего месяца (июль): $a_{\text{эк}} = 7816$ км.

Характер влияния осадков на дальность действия РТС, работающих в УВЧ- и СВЧ-диапазонах, можно видеть в табл. 2, где показано уменьшение дальности действия при наличии гидрометеоров [10]. Для радиоволн ОВЧ-диапазона ослабление пренебрежимо мало.

Таблица 2

Условия прохождения	Уменьшение дальности действия для длин волн, %	
	$\lambda = 30$ см	$\lambda = 10$ см
Пары воды + кислород	9.5	14.6
Туман с видимостью 50 м	0	0
Дождь с интенсивностью 5 мм/ч	0	15.2
Дождь с интенсивностью 100 мм/ч + ослабление в облаках	4.8	38

Влияние гидрометеоров на дальность действия РТС учитывается изменением коэффициента использования радиогоризонта [7]. При расчете зоны действия необходимо полученные с помощью приведенных ранее методик значения

Таблица 3

Условия прохождения	Коэффициент использования радиогоризонта для длин волн		
	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 30$ см	$\lambda = 100$ см
Ясная погода	0.7	0.75	0.8
Дождь с интенсивностью 5 мм/ч	0.6	0.75	0.8
Дождь с интенсивностью 100 мм/ч + ослабление в облаках	0.5	0.70	0.8

дальности действия умножить на коэффициент использования радиогоризонта, значения которого для радиоволн диапазонов ОВЧ, УВЧ, СВЧ представлены в табл. 3.

Применение рассмотренной методики расчета зон действия с учетом влияния рельефа местности и параметров атмосферы позволяет получить более достоверные сведения о перекрытии полей средств навигации, наблюдения и связи, выявить проблемные области воздушного пространства и определить оптимальные позиции размещения новых РТС.

Представленная методика позволяет производить достаточно точные и достоверные расчеты зон действия радиотехнических систем диапазонов ОВЧ, УВЧ и СВЧ. Для определения углов закрытия разработана программа, использующая

данные цифровой модели рельефа SRTM и позволяющая достаточно быстро и в автоматическом режиме получить график углов закрытия для заданной позиции и для заданной высоты поднятия антенны. Для учета влияния параметров атмосферы предлагается рассчитывать значение эквивалентного радиуса Земли исходя из климатических условий конкретного региона. При этом можно получать как среднегодовые значения, так и значения для наихудшего (с точки зрения распространения радиоволн) месяца.

Рассмотренная методика может найти широкое применение в службе эксплуатации радиотехнического оборудования и связи и службе движения при оценке существующей инфраструктуры РТС навигации, наблюдения и связи, а также для выбора оптимальных позиций размещения новых средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seybold J. S. Introduction to RF propagation. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005. 330 p.
2. Рубцов Е. А. Метод расчета зон действия радиотехнических средств связи ОВЧ диапазона с применением цифровых моделей рельефа // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: тр. V науч.-техн. конф. преподавателей, научных работников и аспирантов с междунар. участием, Иркутск, 22–24 марта 2016 г. / Иркутский филиал МГТУ ГА. Иркутск, 2016. С. 100–107.
3. Рубцов Е. А. Разработка и реализация методов расчета эксплуатационных характеристик средств радиотехнического обеспечения полетов: дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петерб. гос. ун-т гражданской авиации. СПб., 2015. 167 с.
4. Соболев Е. В., Книжниченко Н. В., Рубцов Е. А. Расчет дальности радиовидимости с учетом влияния рельефа и атмосферы // Вестн. Санкт-Петерб. гос. ун-та гражданской авиации. 2012. № 1 (3). С. 44–54.
5. Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ // Рекомендация МСЭ-R P.528-3. 2012. 51 с. URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.528-3-2012-02-I!!PDF-R.pdf (дата обращения 06.05.18).
6. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации: международные стандарты, рекомендуемая практика и правила аэронавигационного обслуживания. Т. III. Системы связи // ICAO. 2008. 277 с. URL: http://www.aviadocs.net/icaodocs/Annexes/an10_v4_cons_ru.pdf (дата обращения 06.05.18).
7. Назаров В. Н. Программы и методики наземных и летных проверок радиолокационных средств УВД. М.: Воздушный транспорт, 1989. 112 с.
8. Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equation // Survey Review. 1975. № 176. P. 88–90.
9. Аэроклиматический справочник СССР. Основные аэроклиматические характеристики. Вып. 1, ч. 1. Северные и центральные районы Европейской территории СССР, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 326 с.
10. Быстров Р. П., Соколов А. В., Федорова Л. В. Статистика дальности РЛС в гидрометеорах // Журн. радиоэлектроники. 2012. № 7. С. 3–12.

S. A. Belyaev, A. V. Ekalo
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

E. A. Rubtsov, S. A. Kudryakov
Saint Petersburg State University of Civil Aviation

METHOD OF COVERAGE EVALUATION FOR CIVIL AVIATION RADIO SYSTEMS WHEN SELECTING THE POSITION OF THEIR PLACEMENT

Presents a method of coverage evaluation for civil aviation radio systems, allowing to take into account terrain relief and atmospheric parameters of a considered region. Using the digital elevation model SRTM allows to evaluate the closing angles for the selected position without having to departure to the place for the theodolite survey of the closing angles. The control example for radar 1L118 shows good convergence of simulation results and direct measurements. The parameters of the atmosphere are estimated from the data of long-term observations given in aero climatic reference books. Carrying out of calculations is possible on the average indicators or indicators of the worst month. Considering method can be used to select the optimal positions for radar stations, short-range navigation systems VOR/DME, ground-based automatic dependent surveillance stations, and VHF radio communication radio systems to support existing as well as future flight safety requirements.

Coverage, closing angle, digital elevation model, SRTM, positioning of radio systems, aviation safety

УДК 681.3.07

Т. В. Герасимова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Веб и 3D-графика

Рассматривается возрастающая роль применения трехмерной графики как важной части мультимедийного веб-контента. Представлен и подробно рассмотрен обзор современного уровня техники использования 3D-графики в реальном времени в Интернете, охватывающий методы рендеринга, методы описания сцены и предоставления 3D-данных. Представлены подходы к 3D-рендерингу на основе браузера, классифицированные по уровню декларативного поведения. Показана эволюция стандарта X3D, позволяющего получить более низкий уровень доступа к графическому оборудованию, постоянно увеличивающему мощность. Рассмотренные удаленные методы рендеринга позволяют передавать высококачественную 3D-графику на широкий спектр устройств, а в последние годы также широко изучаются методы доставки контента для веб-3D-приложений. Все эти разработки отражаются в увеличении количества областей, для которых разрабатываются приложения для 3D-сети. Представлен широкий набор технологий, существующих в этой области.

3D, браузер, плагин, HTML5, WebGL, X3D, X3DOM, XML, Three.js, Java, веб, рендеринг, canvas

Веб – интернет-пространство, прошедшее долгий путь с момента появления. Первоначально оно существовало как средство совместного использования удаленных страниц статического текста через Интернет, связанных вместе языком разметки – HTML. Выпуск браузера Mosaic позволил пользователям «просматривать» удаленные «веб-страницы», в которых была представлена смесь текста и изображения [1]. После выпуска

Netscape Navigator и Microsoft Internet Explorer в середине девяностых развитие веб-технологий пошло ускоренными темпами. Каскадные таблицы стилей (CSS), Secure Sockets Layer (SSL), файлы cookie, Java и Javascript, Adobe Flash, XML и AJAX – это только некоторые из используемых технологий. К концу тысячелетия сеть была полна профессионально разработанных страниц, богатых визуальным контентом. Однако интерак-