

Модель расчета линии радиосвязи на основе данных дистанционного зондирования земли

А.Т. Албузов¹, П.Е. Шахов¹, В.И. Филатов² 

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия»
394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54а

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, Россия, г. Москва,
ул. 2-я Бауманская, 5

Аннотация – Обоснование. В процессе функционирования современных комплексов и средств специализированного назначения в условиях прямой видимости между радиосредствами не всегда возможна передача данных, что существенно снижает эффективность системы передачи данных и увеличивает время для поиска новых мест размещения приемопередающих средств. Причина данной проблемы может крыться в особенностях рельефа местности, который оказывает интерференционное и дифракционное влияние на распространение радиосигнала. При этом значительный интерес для решения данной проблемы могут представлять анализ и цифровая модель рельефа местности из данных дистанционного зондирования земли и реализации на его основе автоматизированных расчетов по поиску наилучших с точки зрения электромагнитной совместимости координат в требуемых районах. **Цель.** Основная цель работы определяется необходимостью разработки алгоритмов и программной реализации инструмента, который в итоге позволит при заданных характеристиках аппаратных средств оперативно и достоверно проанализировать возможность и оценить параметры для организации устойчивой радиосвязи еще на этапе планирования с использованием спутниковых интерактивных карт. **Метод.** В статье представлены разработанные алгоритмы и скриншоты реализации программы расчета интерференционного влияния рельефа с учетом подстилающей поверхности на интервале линии радиосвязи. **Результаты.** Представлены результаты программной реализации, которая осуществляет расчет существенной зоны распространения радиосигнала в соответствии с радиочастотой, классифицирует канал в зависимости от наличия в существенной зоне препятствий рельефа, определяет точку отражения на радиотрассе по принципу равенства углов падения и отражения и проверяет ее принадлежность направлениям диаграмм антенн, осуществляет учет коэффициента отражения у подстилающей поверхности водного объекта в точке отражения и рассчитывает величину интерференционных потерь. **Заключение.** Разработана программа, позволяющая определять напряженность поля излучателя в любой точке участка местности с учетом препятствий.

Ключевые слова – существенная зона распространения сигнала; ослабление радиосигнала; рельеф местности; цифровая модель рельефа; SRTM.

Введение

Устойчивая и непрерывная радиосвязь – залог эффективности применения современных средств специализированного назначения. Для оперативной оценки условий применения средств радиосвязи необходимы инструменты, позволяющие проводить оценку физико-географических условий района и влияния на каналы радиосвязи условий пересеченной местности. Как показывает практика, нередко при использовании комплексов и средств специализированного назначения в условиях, удовлетворяющих критерию оптической (прямой) видимости между средствами, радиосвязь отсутствует, что приводит к поиску новых вариантов размещения с последующим перемещением, повторным развертыванием средств, или работа осуществляется в неавтоматизированном режиме, если линия радиосвязи используется для внутрикомплексного обмена, что существенно

снижает эффективность. Как показала практика, наибольшим спросом пользуется программное обеспечение, позволяющее применять спутниковые интерактивные карты, которые дают возможность при выборе мест размещения средств достаточно детально анализировать пригодность выбираемых мест для размещения по таким критериям, как наличие транспортной доступности, наличие естественных препятствий ландшафта и местности.

Существующие стандарты и рекомендации [1; 2] по расчету линий радиосвязи обладают сложным изложением материала и сориентированы для проектировочных работ с результатами в виде оптимальных высот размещения антенных устройств в линии радиосвязи для ее устойчивого функционирования. При применении мобильных средств и комплексов специализированного назначения, как правило, высота антенных устройств неизменна, лица, определяющие места размещения

средств, ищут компромисс между всеми факторами, влияющими на эффективность в условиях крайне ограниченного времени и ограниченных возможностей территориального маневра силами и средствами.

1. Теоретические положения модели

Качественная и устойчивая радиосвязь не обуславливается лишь наличием оптической (прямой) зоны видимости между точками приема и передачи. Рельеф местности в зависимости от его конфигурации оказывает интерференционное и дифракционное влияние на радиосигнал. Как минимум лучевую модель распространения радиосигнала можно использовать при полном отсутствии препятствий в существенной зоне распространения, что все равно требует проведения расчетов и оценки. Таким образом, существенную пользу окажет программное обеспечение, доступное для пользователя и устанавливаемое на портативные средства с операционной системой типа Android, а не только на специализированные стационарные ЭВМ и ноутбуки, которые также могут быть с различными операционными системами. С этой точки зрения и с точки зрения кросс-платформенности представляет интерес реализация на языке программирования Java. Существенный интерес представляет рассмотрение возможности генерации рельефа местности из данных дистанционного зондирования Земли и реализации на его основе автоматизированных расчетов. По оценке научного геоинформационного центра РАН, а также на основе проведенных исследований точности модели Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) [3] с абсолютными высотами земной поверхности в углах с точностью до 3 угловых секунд (или примерно 90×90 м) в самой крупной в России широтно ориентированной близ $52\text{--}55^\circ$ с. ш. зоне разницы между SRTM-матрицей и отметками государственной геодезической сети изменяется от $-3,5$ до $-4,5$ м, а в нулевых зонах от $-0,5$ до $+0,5$ м и т. д. (рис. 1). Другим типом международных файлов DEM SRTM являются файлы цифровой модели рельефа, которые опубликованы с точностью до 1 угловой секунды (или примерно 30×30 м) и демонстрируют улучшенный характер данных SRTM с самым высоким разрешением из тех, которые сейчас открыто публикуются.

Таким образом, целью работы являлась разработка алгоритмов и программная реализация инструмента, позволяющего при заданных харак-

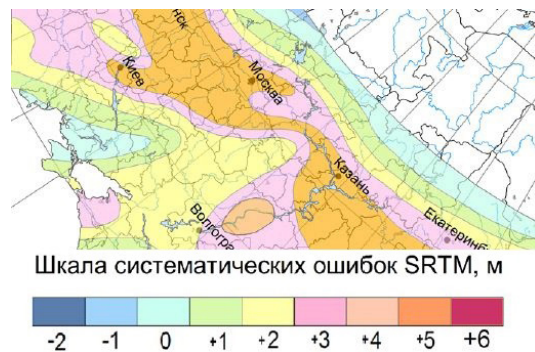


Рис. 1. Фрагмент карты зональности систематических ошибок на матрице высот SRTM с точностью до 3 угловых секунд (или примерно 90×90 м) в пределах территории Северной Евразии
Fig. 1. Fragment of the map of zonality of systematic errors on the SRTM height matrix with an accuracy of up to 3 arc seconds (or approximately 90×90 m) within the territory of Northern Eurasia

теристиках средств оперативно и достоверно проанализировать возможность организации устойчивой радиосвязи еще на этапе планирования с использованием спутниковых интерактивных карт.

Обращение к данным DEM SRTM осуществляется с геодезическими координатами мест размещения средств, получение которых легко реализовать использованием современных интерактивных карт.

Уравнение передачи [1–4; 7] связывает мощность сигнала на входе приемника с энергетическими параметрами и затуханием (ослаблением) радиоволн на интервалах. В соответствии с этим мощность сигнала на входе приемника сравнивается с потерями на интервале для получения запаса уровня сигнала, от которого будет зависеть качество радиосвязи в развертываемой линии.

Исходя из анализа существующих рекомендаций по расчету [7; 8] и теоретических положений по распространению радиоволн [4–6], отметим затрудняющие оперативное определение условий и оценку обстановки особенности по всем этапам проведения расчетов.

Первоначальный этап – предварительное определение мест размещения средств, построение профиля местности на интервале линии внутрикомплексной радиосвязи с учетом эквивалентного радиуса Земли и вертикального градиента диэлектрической проводимости для соответствующего географического региона, расчет существенной зоны распространения радиосигнала, классифицирование канала. Кроме построения профиля местности также классифицирование канала усложняется необходимостью проведения

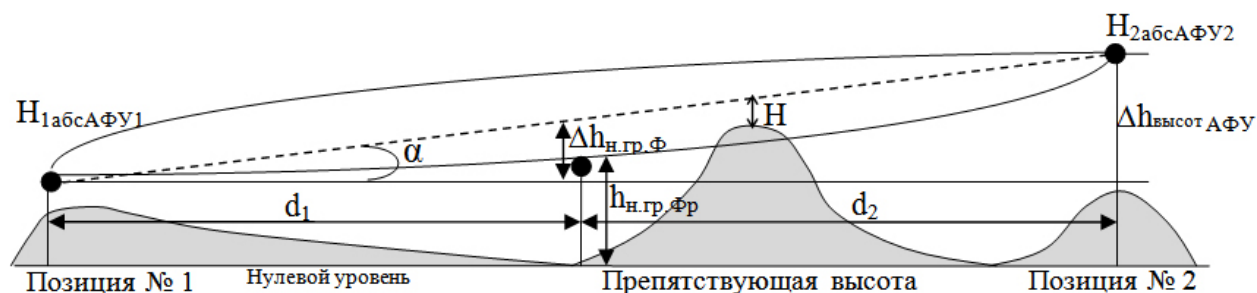


Рис. 2. Расположение существенной зоны распространения радиосигнала при разности высот антенн
Fig. 2. Location of the significant radio signal propagation zone with a difference in antenna heights

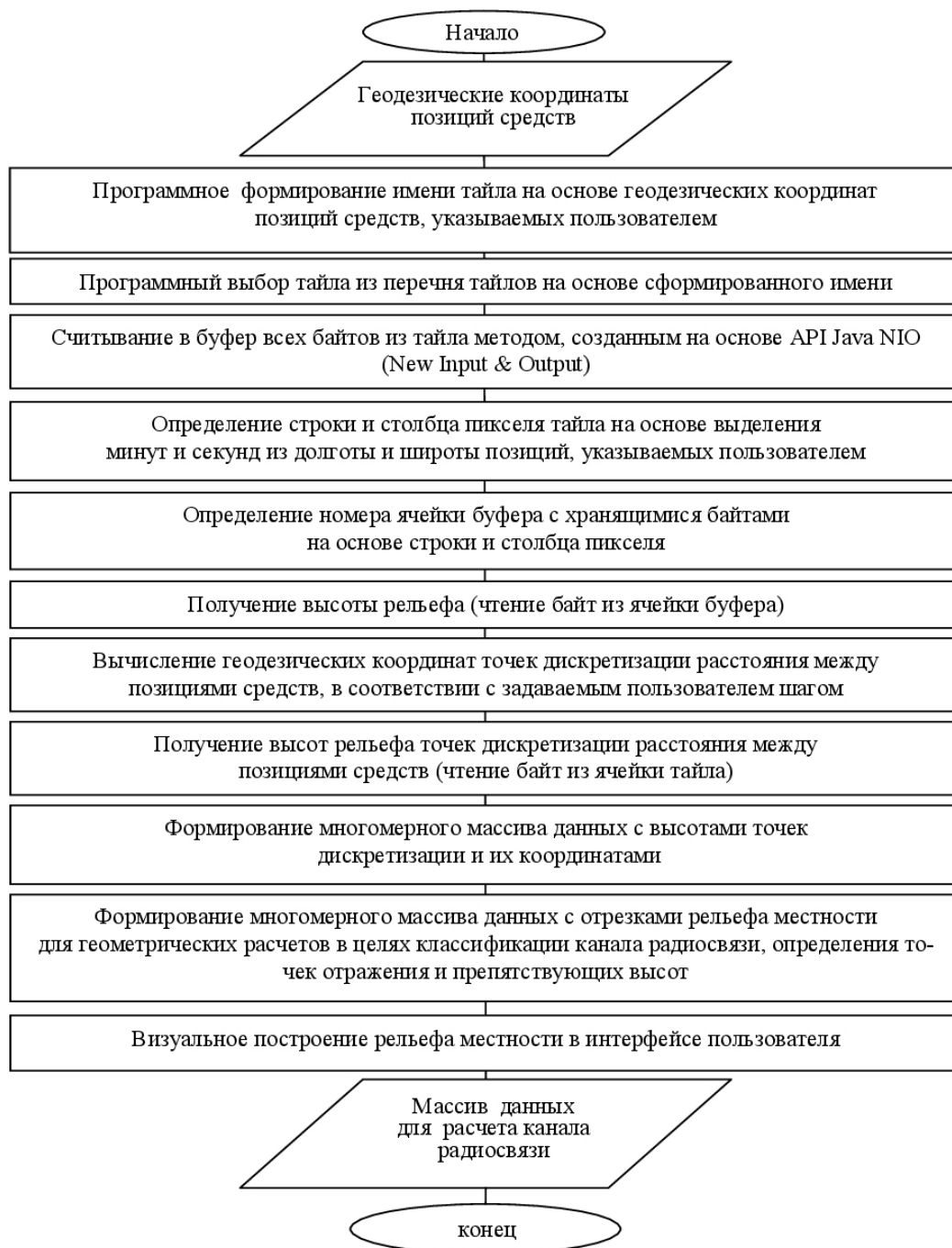
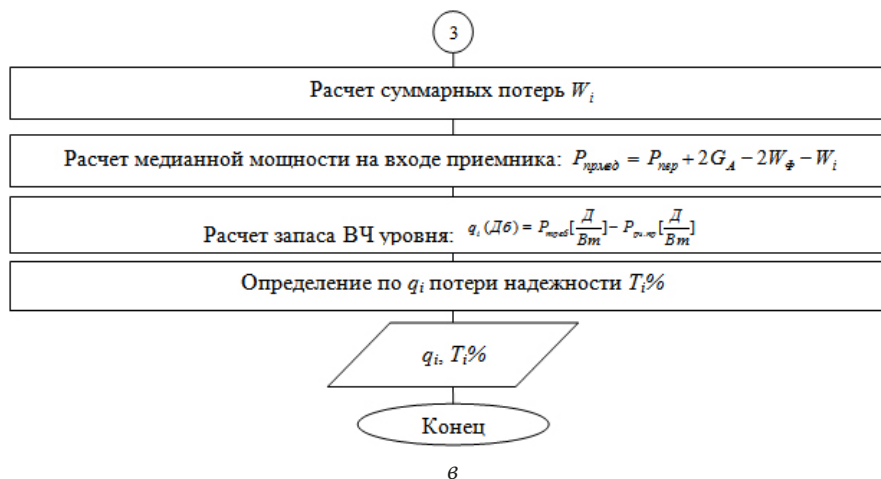


Рис. 3. Алгоритм извлечения данных о высотах рельефа местности из файла DEM SRTM и генерации профиля рельефа местности между средствами радиосвязи

Fig. 3. Algorithm for extracting terrain elevation data from a DEM SRTM file and generating a terrain profile between radio communication facilities



Рис. 4. Алгоритм расчета потерь в линии радиосвязи
Fig. 4. Algorithm for calculating losses in a radio communication line



(Продолжение) Рис. 4. Алгоритм расчета потерь в линии радиосвязи
(Continuation) Fig. 4. Algorithm for calculating losses in a radio communication line

Таблица. Перечень и описание созданных классов
Table. List and description of created classes

Наименование класса	Описание класса
SRTMEle	Методы класса возвращают значения высот на интервале радиотрассы, обращение к классу и его методам осуществляется в других классах и методах для программного преобразования координат, программных геометрических расчетов, расчетов потерь в линии радиосвязи и визуального отображения результатов расчета в интерфейсе пользователя, получение значений высот осуществляется на основе передаваемых в методы класса геодезических координат точки
SpaceXYZ	Методы класса возвращают значения прямоугольных пространственных координат, расчет производится на основе передаваемых в методы класса геодезических координат выбираемых точек
SRTM_Distance Calculation	Методы класса возвращают расстояние между двумя точками, расчет осуществляется на основе передаваемых в методы класса прямоугольных пространственных координат точек
SRTMGeodezCoordCalc_fromXYZSpace	Методы класса возвращают геодезические координаты (широту и долготу), расчет осуществляется на основе передаваемых в методы класса прямоугольных пространственных координат точек
SRTMSk42Coord	Методы класса возвращают плоские прямоугольные координаты СК42, расчет осуществляется на основе передаваемых в методы класса геодезических координат
ArrHeight CalculationGeodez	Методы класса возвращают массив данных точек с выбираемым шагом дискретизации рельефа местности на радиотрассе, массив содержит информацию о высоте точки, ее геодезических и плоских пространственных координатах, обращение к классу и его методам осуществляется в интересах дальнейших преобразований, геометрических расчетов, расчетов потерь в линии радиосвязи и визуального отображения результатов расчета в интерфейсе пользователя

геометрических расчетов при разности высот антенных устройств (рис. 2).

Указанные на рис. 2 обозначения характеризуют следующие параметры: $h_{н. гр. Фр}$ – высота нижней границы существенной зоны распространения радиосигнала (первой зоны Френеля), которая отсекает часть препятствия, $H_{1,2абсАФУ}$ – высоты мачт соответствующих антенно-фидерных устройств, $\Delta h_{н. гр. Фр}$ – величина смещения нижней границы зоны вниз или вверх.

Второй этап расчета – расчет влияния на распространение радиосигнала атмосферы и рельефа местности. На данном этапе необходимо произвести расчет потерь свободного пространства, расчет потерь в атмосфере и в соответствии с проведенной классификацией канала и анализа профиля на первоначальном этапе определить величину интерференционных и дифракционных потерь. При открытом интервале рассчитывается интерференционное влияние рельефа (точки отражения

(Продолжение) Таблица. Перечень и описание созданных классов
(Continuation) Table. List and description of created classes

Наименование класса	Описание класса
ArrHeightWater	Методы класса возвращают массив данных, который содержит информацию об абсолютном уровне водного объекта и координаты границ водного объекта, которые определяются пользователем на интерактивной карте на радиотрассе
CalculationRadioLinkFild	Методы класса возвращают: значения координат для визуального отображения в интерфейсе пользователя существенной зоны распространения радиосигнала в соответствии с его радиочастотой; абсолютные высоты антенно-фидерных устройств; в соответствии с шагом дискретизации рельефа массив отрезков для запрограммированных геометрических расчетов в целях классификации канала и поиска точки отражения и ее принадлежности к участку местности; координаты точек отражения на основе равенства углов падения и отражения радиосигнала; значение разности хода ЭМВ, величину сдвига фаз, множитель интерференционного ослабления; величину ослабления радиосигнала с учетом ослабления свободного пространства; величину просвета на радиотрассе в каждой точке в соответствии с выбираемым шагом дискретизации и классификацию канала радиосвязи
XYPolyReliefCalculation	Методы класса возвращают значения координат полиномов для визуального отображения в интерфейсе пользователя профиля рельефа местности, профиля водного объекта в соответствии с шагом дискретизации рельефа

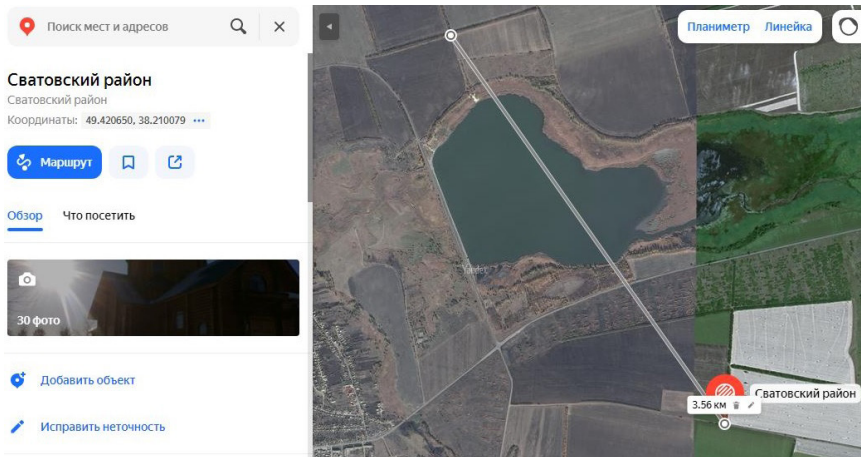


Рис. 5. Выбор мест размещения средств и получение их геодезических координат на интерактивной карте
Fig. 5. Selecting locations for the placement of funds and obtaining their geodetic coordinates on an interactive map

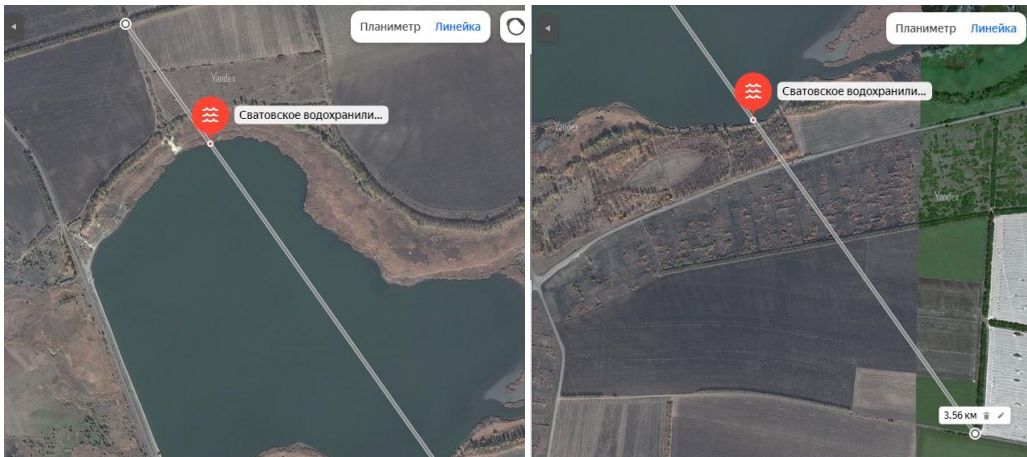


Рис. 6. Определение границ водного объекта и получение их геодезических координат на интерактивной карте
Fig. 6. Determining the boundaries of a water body and obtaining their geodetic coordinates on an interactive map

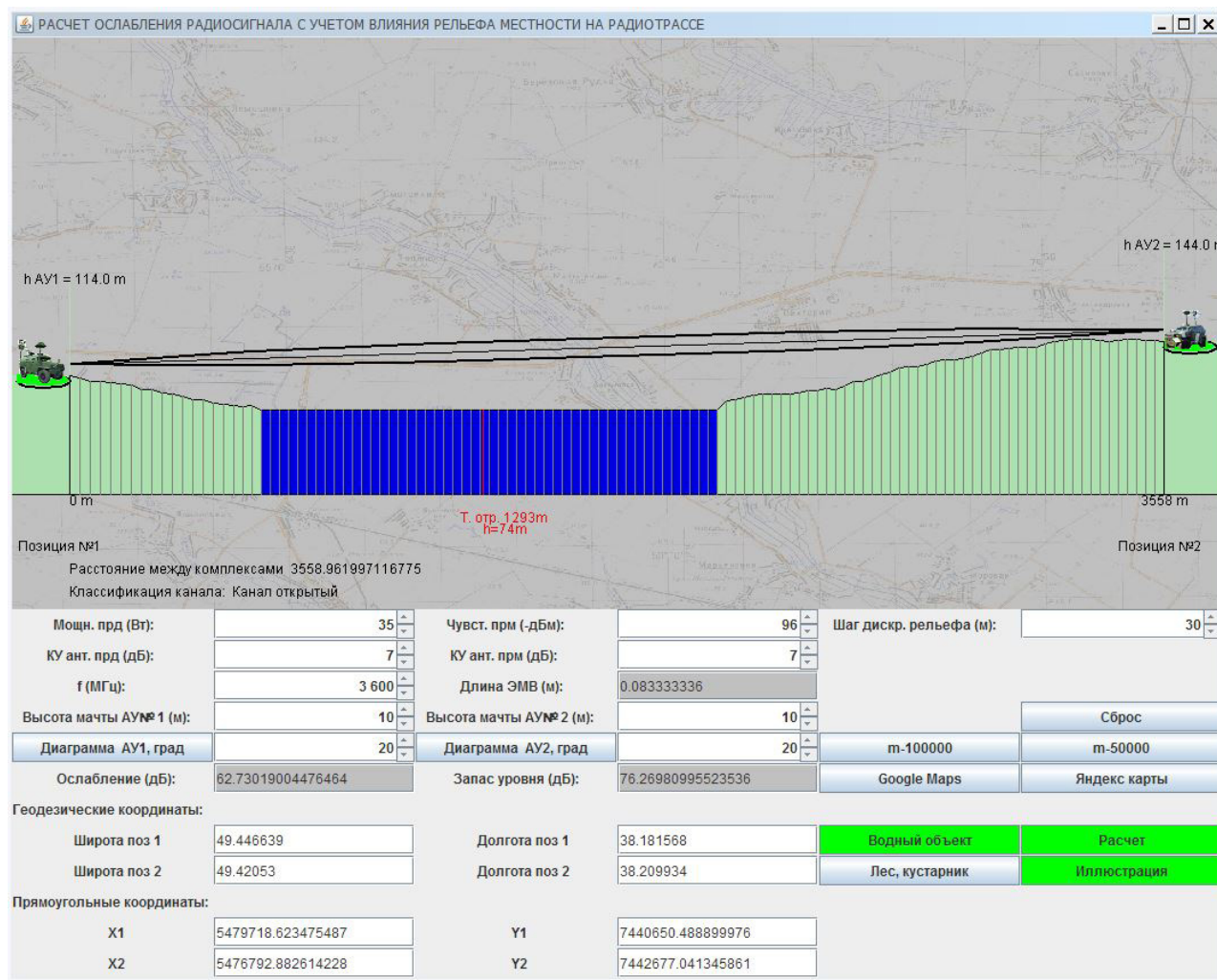


Рис. 7. Интерфейс программы (окно с отображением сгенерированного рельефа местности и расчетом канала линии радиосвязи в соответствии с установленными параметрами приемной и передающей аппаратуры)

Fig. 7. Program interface (window displaying the generated terrain and calculating the radio communication channel in accordance with the set parameters of the receiving and transmitting equipment)

с большой вероятностью должны присутствовать на радиотрассе), при полужакрытом интерференционное влияние рельефа и дифракционное и при закрытом – дифракционное. Данный этап существенно осложняется: поиском точек отражения, необходимостью учета подстилающей поверхности в точках отражения и их принадлежности направлению диаграммы направленности антенных устройств с целью оценки ослабления отраженного сигнала и необходимостью аппроксимации полужакрытых и затеняющих препятствий для применения соответствующих методов расчета.

На заключительном этапе расчета требуется определить запас уровня q_i и в соответствии с уравнением качества, которое связывает качество связи по каналам на интервале Q с уровнем сигнала на входе приемника P_{np} , определяется потеря надежности на интервале радиолнии по графикам зависимости, приведенным в [4; 7]. Если

величина потери надежности связи на интервале $T_i\% < T_{i\%ад}$, то качество связи на интервале УКВ-радиолнии удовлетворяет заданным требованиям на качество связи. Для линий связи с внутри-комплексной передачей данных величина потери допускается не более 5 %.

2. Разработка алгоритмов модели

На рис. 3 приведен разработанный алгоритм извлечения данных о высотах рельефа местности из файла DEM SRTM с разрешением 1 угловая секунда.

На рис. 4 показаны разработанные алгоритмы расчета потерь в линии радиосвязи в целях их программной реализации.

На момент публикации статьи осуществлена программная реализация в части, касающейся генерации профиля рельефа соответствующих геоде-

зическим координатам мест размещения средств, а также расчета интерференционных потерь в линии радиосвязи. В таблице приведено описание созданных классов при разработке программы.

3. Программная реализация модели

Выбор мест размещения средств радиосвязи, определение границ водного объекта на радиотрассе и получение их геодезических координат на интерактивной карте отображены на рис. 5, 6.

Интерфейс разработанной программы с получаемыми результатами расчета и генерации рельефа местности приведен на рис. 7. Полученные результаты генерации рельефа местности между выбранными местами размещения средств соответствуют визуально определяемому на топографической карте с масштабом 1:100000 уровням высот. Программа осуществляет расчет существенной зоны распространения радиосигнала в соответствии с радиочастотой, классифицирует канал в зависимости от наличия в существенной зоне пре-

пятствий рельефа, определяет точку отражения на радиотрассе по принципу равенства углов падения и отражения и проверяет ее принадлежность направлениям диаграмм антенн, осуществляет учет коэффициента отражения у подстилающей поверхности водного объекта в точке отражения и рассчитывает величину интерференционных потерь. Программа также осуществляет точный пересчет геодезических координат мест размещения средств радиосвязи в плоские прямоугольные координаты, которые при необходимости могут быть использованы пользователем.

Заключение

Таким образом, проанализированы существующие рекомендации, методики по расчету линии радиосвязи, структура файлов DEM SRTM, проведена разработка алгоритмов и на их основе программная реализация расчета интерференционного влияния рельефа местности в линии радиосвязи.

Список литературы

1. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. М.: Стандартиформ, 2010.
2. Распространение радиоволн за счет дифракции. Рекомендации МСЭ-Р Р.526-10. М.: Стандартиформ, 2007.
3. Орлянкин В.Н., Алешина А.Р. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019572-81>
4. Военные системы радиорелейной и тропосферной связи / под ред. А.П. Родимова. Л.: ВАС, 1984. 414 с.
5. Радиорелейные и спутниковые системы передачи / под ред. А.С. Немировского. М.: Радио и связь, 1986. 213 с.
6. Теория электрической связи / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
7. Математическая модель канала связи с беспилотным летательным аппаратом / Н.С. Архипов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 3. С. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.3.71-79>
8. Нестеров В.Н., Ли А.Р. Технологический метод проектирования измерительных приборов и систем для работы в неизвестных заранее условиях эксплуатации // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 2. С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.2.69-76>

Информация об авторах

Албузов Андрей Таирович, кандидат военных наук, преподаватель кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: радиофизика, распространение радиоволн, теория радиосвязи.

E-mail: albuzov81@mail.ru

Шахов Павел Евгениевич, курсант Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: радиофизика, распространение радиоволн, теория радиосвязи.

E-mail: vva@mil.ru

Филатов Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры ИУ-10 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия.

Область научных интересов: радиофизика, распространение радиоволн, теория радиосвязи.

E-mail: vf110@mail.ru

SPIN-код (eLibrary): 9514-7430

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6892-2236>

Model calculation of a radio communication line based on remote sensing data

Adrey T. Albuzov¹, Pavel E. Shakhov¹, Vladimir I. Filatov² 

¹ Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy»

54a, Staryh Bolshevikov Street,
Voronezh, 394064, Russia

² Bauman Moscow State Technical University

5, 2nd Baumanskaya Street,
Moscow, 105005, Russia

Abstract – Background. In the process of functioning of modern complexes and specialized equipment in conditions of direct visibility between radio facilities, data transmission is not always possible, which significantly reduces the efficiency of the data transmission system and increases the time to search for new locations for transceivers. The reason for this problem may lie in the peculiarities of the terrain, which has an interference and diffraction effect on the propagation of the radio signal. At the same time, analysis and a digital terrain model from earth remote sensing data and the implementation of automated calculations based on it to find the best coordinates in terms of electromagnetic compatibility in the required areas may be of significant interest for solving this problem. **Aim.** The main purpose of the work is determined by the need to develop algorithms and software implementation of the tool, which will eventually allow, given the characteristics of the hardware, to promptly and adequately analyze the possibility and evaluate the parameters for organizing stable radio communications even at the planning stage using interactive satellite maps. **Methods.** The article presents the developed algorithms and screenshots of the implementation of the program for calculating the interference effect of the relief, taking into account the underlying surface in the radio communication interval. **Results.** The results of the program implementation are presented, which calculate the essential propagation zone of the radio signal in accordance with the radio frequency, classifies the channel depending on the presence of terrain obstacles in the essential zone, determines the reflection point on the radio path according to the principle of equality of angles of incidence and reflection and verifies its belonging to the directions of antenna diagrams, takes into account the reflection coefficient at the underlying surface of a water body at the reflection point and calculates the amount of interference losses. **Conclusion.** A program has been developed that allows you to determine the intensity of the emitter field at any point of the terrain, taking into account obstacles.

Keywords – significant signal propagation zone; radio signal attenuation; terrain; digital terrain model; SRTM.

✉ vfil10@mail.ru (Vladimir I. Filatov)

 © Adrey T. Albuzov et al., 2024

References

1. *Digital Radio Relay Lines. Quality Indicators. Calculation Methods.* Moscow: Standartinform, 2010. (In Russ.)
2. *Propagation of Radio Waves Due to Diffraction. Recommendations,* ITU-P P.526-10. Moscow: Standartinform, 2007. (In Russ.)
3. V. N. Orlyankin and A. R. Aleshina, "Using SRTM height matrices in preliminary calculations and mapping the depths of potential flood inundation of river floodplains," *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 5, pp. 72–81, 2019, doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019572-81>. (In Russ.)
4. P. Rodimov, Ed. *Military Radio Relay and Tropospheric Communication Systems.* Leningrad: VAS, 1984. (In Russ.)
5. S. Nemirovsky, Ed. *Radio Relay and Satellite Transmission Systems.* Moscow: Radio i svyaz', 1986. (In Russ.)
6. D. D. Klovsky, Ed. *Electrical Communication Theory.* Moscow: Radio i svyaz', 1999. (In Russ.)
7. N. S. Arkhipov et al., "Mathematical model of a communication channel with an unmanned aerial vehicle," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 71–79, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.3.71-79>. (In Russ.)
8. V. N. Nesterov and A. R. Li, "Technological method for the design of measuring instruments and systems for operation in previously unknown operating conditions," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 69–76, 2019, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.2.69-76>. (In Russ.)

Information about the Authors

Andrey T. Albuzov, Candidate in Military Sciences, lecturer of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy», Voronezh, Russia.

Research interests: radiophysics, radio wave propagation, radio communication theory.

E-mail: albuzov81@mail.ru

Pavel E. Shakhov, cadet of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy», Voronezh, Russia.

Research interests: radiophysics, radio wave propagation, radio communication theory.

E-mail: vva@mil.ru

Vladimir I. Filatov, Candidate in Engineering Sciences, associate professor at the Department of IU-10, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Research interests: radiophysics, radio wave propagation, radio communication theory.

E-mail: vfil10@mail.ru

SPIN-code (eLibrary): 9514-7430

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6892-2236>