



БАЙЛАНЫС
СВЯЗЬ
CONNECTION

DOI 10.51885/1561-4212_2021_1_70
MPHTI 49.43.31

**Е.А. Дайнеко¹, А.З. Айтмагамбетов², А.Е. Кулакаева³, Д.Д. Цой⁴, Б.А. Кожаметова⁵,
М.Т. Ипалакова⁶, А.М. Сейтнұр⁷**

Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

¹**E-mail:** y.daineko@iitu.edu.kz*

²**E-mail:** altayzf@mail.ru

³**E-mail:** aigul_k.pochta@mail.ru

⁴**E-mail:** danatsoy@gmail.com

⁵**E-mail:** bagdatka_0794@mail.ru

⁶**E-mail:** m.ipalakova@gmail.com

⁷**E-mail:** aigerim.seitnurova@mail.ru

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

РАДИОТЕХНИКАЛЫҚ ПӘНДЕРДІ ЗЕРДЕЛЕУ ҮШІН ВИРТУАЛДЫ ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЖҰМЫСТАРДЫ ӨЗІРЛЕУ

DEVELOPMENT OF VIRTUAL LABORATORY WORK FOR THE STUDY OF RADIO ENGINEERING DISCIPLINES

Аннотация. Данная работа посвящена внедрению новых средств в образовательный процесс, которые позволяют повысить эффективность и восприимчивость изучаемого материала. В статье рассматривается использование различных мультимедийных средств в обучении, мировой опыт этой интеграции, а также новые тенденции, пришедшие в связи с пандемией коронавирусной инфекции.

В частности, рассматривается разработка виртуальных работ для изучения радиотехнических дисциплин на примере работы, посвященной изучению принципов работы системы радиомониторинга на базе малого космического аппарата. Приведены методика работы, физико-математическое обеспечение, инструменты, которые использовались для реализации и разработки приложения. Также описан процесс реализации программы, ее основные элементы, логика работы.

Ключевые слова: Виртуальные лабораторные работы; радиотехнические дисциплины; 3D моделирование; Unity3D; C# (CSharp); радиосистема.

Аңдатпа. Бұл жұмыс зерттелетін материалдың тиімділігі мен сезімталдығын арттыруға мүмкіндік беретін білім беру процесіне жаңа құралдарды енгізуге арналған. Мақалада оқытуда әртүрлі мультимедиялық құралдарды қолдану, осы интеграцияның әлемдік тәжірибесі, сондай-ақ коронавирустық инфекция пандемиясымен бірге пайда болған жаңа тенденциялар қарастырылады.

Атап айтқанда, кіші ғарыш аппараты негізінде радиомониторинг жүйесінің жұмыс принциптерін зерттеуге арналған жұмыс мысалында радиотехникалық пәндерді зерделеу үшін виртуалды жұмыстарды өзірлеу қарастырылуда. Жұмыс әдістері, физика-математикалық қамтамасыздандыру, қосымшаны іске асыру және өзірлеу үшін қолданылатын құралдар келтірілген. Сондай-ақ Бағдарламаны іске асыру процесі, оның негізгі элементтері, жұмыс логикасы

сипатталған.

Түйін сөздер: *Виртуалды зертханалық жұмыстар; радиотехникалық пәндер; 3D модельдеу; Unity3D; C# (CSharp); радиожүйе.*

Abstract. *This paper is devoted to the introduction of new tools in the educational process, which allow to increase the efficiency and receptivity of the studied material. The article examines the use of various multimedia tools in teaching, the world experience of this integration, as well as new trends that came along with the pandemic of coronavirus infection.*

In particular, the paper considers the development of virtual works for studying radio engineering disciplines on the example of the work devoted to studying the principles of radio monitoring system on the basis of a small spacecraft. The methods of work, physical and mathematical support, tools that were used to implement and develop the application are given. Also described the process of implementing the program, its main elements, the logic of operation.

Keywords: *Virtual laboratory work; radio engineering disciplines; 3D modeling; Unity3D; C# (CSharp); radio system.*

Введение. В настоящее время с внедрением инфокоммуникационных технологий в учебном процессе все более актуальным стало использование мультимедийных средств обучения не только на лекционных, но и на лабораторных занятиях. Особенно остро этот вопрос встал в условиях сложившейся ситуации пандемии коронавирусной инфекции. На основании приказа Министра образования и науки Республики Казахстан [1] в учебных заведениях вводится обучение с использованием дистанционной образовательной технологии (ДОТ). Технология дистанционного обучения подразумевает организацию учебного процесса на расстоянии, при которой обучающийся и преподаватель отдалены друг от друга, а взаимодействие между ними осуществляется с использованием инфокоммуникационных технологий.

Лабораторная работа, являясь одним из методов обучения, предназначена для закрепления теоретического материала студента на практике. Для выполнения лабораторной работы необходимо наличие специализированного оборудования и инструмента. В процессе выполнения лабораторных заданий студентом приобретаются навыки работы с оборудованием, проведения различных измерений и экспериментов. Для более эффективного, с применением интерактивных и мультимедийных процессов, проведения лабораторного занятия во многих высших учебных заведениях все больше находят применение виртуальные лабораторные работы [2], [3]. В данной статье рассматриваются вопросы создания виртуальной лабораторной работы для дистанционного обучения по изучению радиосистем сверхвысоких (СВЧ) и крайне высоких (КВЧ) диапазонов. Основная задача виртуальных лабораторных работ состоит в том, чтобы студент овладел общей теорией построения систем радиосвязи СВЧ и КВЧ диапазонов, усвоил принципы работы устройств формирования, передачи, приема и обработки радиосигналов, был способен производить измерения основных характеристик радиосигнала, а также приобрел навыки работы с приемно-передающей аппаратурой различных систем радиосвязи.

На сегодняшний день известно большое количество специализированных программ моделирования и расчета каналов радиосвязи. Рассмотрим некоторые из них: ANSYS HFSS, CST Microwave Studio, MATLAB/Simulink, Wireless InSite, ZETLAB.

ANSYS HFSS – это программное обеспечение для трехмерного электродинамического моделирования, предназначенное для проектирования и моделирования высокочастотных устройств (ВЧ) и антенн [4]. Данная программа является наиболее популярной и находит применение при разработке антенн, антенных решеток и сложных элементов ВЧ и СВЧ-схем.

CST Microwave Studio – предназначена для быстрого и точного численного моделирования ВЧ устройств, таких как антенны, фильтры, ответвители мощности. Также программа применяется для анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения [5].

MATLAB/Simulink – среда динамического моделирования сложных технических систем и устройств. Simulink, являясь подсистемой MATLAB, осуществляет имитационное моделирование системы. Большое количество компонентов (блоков) в библиотеке Simulink позволяет создавать сложные модели каналов радиосвязи, исследовать структуру радиосигнала, антенную часть радиосистемы.

Программа Wireless InSite является специализированной программой для расчета радиотрассы при различных типах застройки (крупный город, село и др). Программа позволяет проектировать беспроводные линии связи, оптимизировать покрытие антенн систем связи и анализировать ключевые характеристики канала связи для ВЧ и СВЧ диапазонов частот. Также в программе Wireless InSite возможно моделирование будущих сетей мобильной связи 5G, работающих в миллиметровом диапазоне частот [6].

Виртуальная лаборатория ZETLAB – специализированная программа, предоставляющая возможности спектрального анализа сигналов, измерения электрических параметров, генерации, записи и воспроизведения сигналов [7].

Все рассмотренные программы моделирования обладают своими преимуществами и позволяют воспроизводить процессы, протекающие в реальных условиях работы систем. Стоит также отметить, что виртуальная лабораторная работа дает возможность обучающимся расширить свой научный потенциал, а также увеличить познания в практической части работы.

Данная статья посвящена разработке программного приложения для измерения основных параметров земной станции спутниковой связи.

Физико-математическое обеспечение. Целью разрабатываемой виртуальной лабораторной работы является измерение основных параметров земной станции спутниковой связи, а также изучение особенностей распространения радиоволн СВЧ и КВЧ диапазонов и оценка энергетического бюджета спутникового радиоканала.

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема типовой земной станции (ЗС). Станция содержит приемопередающую антенну, приемный тракт, включающий малошумящий усилитель, преобразователь частоты «вниз» и приемную часть модема (демодулятор), тракт передачи в составе модулятора, преобразователь частоты «вверх», усилитель мощности. Также в ЗС входят системы наведения, контроля и управления и дополнительное оборудование.

На распространение радиоволн самое существенное влияние оказывают электрофизические параметры Земли, ионосферы, тропосферы, рельеф местности и пр. [8]. Одновременный учет всех этих факторов представляет собой весьма сложную задачу, при этом в зависимости от диапазона частот роль каждого из них меняется. Поэтому при изучении вопросов, связанных с распространением радиоволн в конкретном диапазоне, целесообразно построить такую модель, которая, с одной стороны, будет отражать все наиболее существенные для данного диапазона волн свойства Земли и ее атмосферы, а с другой – была бы проста для исследования.

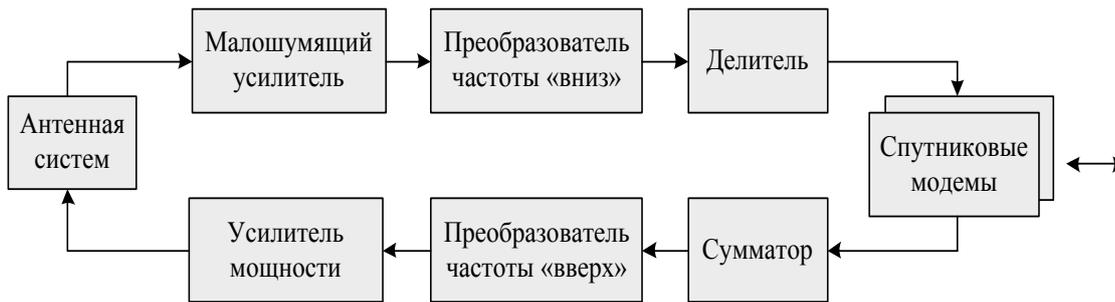


Рисунок 1. Упрощенная структурная схема типовой земной станции

При проектировании спутниковой системы необходимо учитывать такие параметры, как энергетическая добротность G/T , кросс-поляризационная развязка антенны на прием и передачу, эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ), уровень продуктов интермодуляции передатчика, уровень побочных излучений внеполосные излучения, оценка энергетического бюджета радиолинии «Наземный передатчик – Бортовой приёмник» и т. д.

Расчет энергетического бюджета радиолинии необходимо начинать с определения величины ЭИИМ, которая определяется по формуле [9], [10]:

$$P_{ЭИИМ} = P_{пер} + G_{пер} - L_{пер}, \quad (\text{дБВт}), \quad (1)$$

где $P_{пер}$ – мощность передатчика, дБВт; $G_{пер}$ – коэффициент усиления антенны, дБ; $L_{пер}$ – потери в фидерном тракте передатчика, дБ.

Мощность сигнала на входе приемного устройства рассчитывается как

$$P_{вх} = ЭИИМ - \Sigma L + G_{прм} - L_{прм}, \quad (\text{дБВт}), \quad (2)$$

где $L_{прм}$ – потери на входе приемника, дБ; L – суммарная потеря, дБ; $G_{прм}$ – коэффициент усиления приемной антенны, дБи.

Также необходимо учитывать общую мощность шумов, которые создаются на входе приемника различными источниками (эквивалентная шумовая температура). Эквивалентная шумовая температура системы рассчитывается следующим образом [11], [12]:

$$T_{эkv} = T_A \cdot L_{прм} + 290 \cdot (1 - L_{прм}) + (F - 1) \cdot 290, \quad (\text{К}), \quad (3)$$

где T_A – шумовая температура антенны, К; F – коэффициент шума приемника; $L_{прм}$ – потери в приемнике, дБ.

Радиоизлучение земной атмосферы имеет тепловой характер и в полной мере обусловлено поглощением сигналов в атмосфере. В силу термодинамического равновесия атмосфера излучает такое же количество энергии на данной частоте, которое поглощает. Шумовая температура атмосферы определяется по формуле:

$$T_{я.атм} = T_{a.cp} (1 - 10^{(-Ar - Ac - Ag)/10}), \quad (4)$$

где $T_{a.cp}$ – средняя термодинамическая температура стандартной атмосферы; Ar – ослабление за счет гидromетeоров, дБ; Ag – ослабление в атмосферных газах, дБ; Ac – ослабление из-за облачности, дБ.

Помимо потерь в свободном пространстве, при распространении радиоволн по радиотрассам на характеристики радиосигнала также влияет окружающая среда, то есть радиоволна испытывает дополнительные потери, которые определяются следующим образом:

$$\sum L = L_{\text{пр}} + A_t + L_{\text{пол}} + L_{\text{нав.прд}} + L_{\text{нав.прм}} + L_{\text{пп}}, \quad (\text{дБ}), \quad (5)$$

где A_t – общее суммарное ослабление радиосигналов в атмосфере; $L_{\text{пол}}$ – поляризационные потери; $L_{\text{нав.прд}}$, $L_{\text{нав.прм}}$ – потери, вызванные ошибками наведения передающей и приемной антенн, дБ; $L_{\text{пп}}$ – прочие потери, связанные с межсимвольной интерференцией, помехами соседнего канала и тд, дБ.

Коэффициент усиления антенны ЗС на прием и на передачу можно оценить по формуле:

$$G = 20,4 + 20\lg D + 20\lg F + 10\lg \eta, \quad [\text{дБ}], \quad (6)$$

где D – диаметр зеркала антенны, м; F – рабочая частота, ГГц; η – коэффициент использования поверхности антенны (типичное значение 0,4÷0,6).

Вычисление значения энергетической добротности G/T при рабочем угле места антенны производится по формуле:

$$G/T = L + L_{\text{АТМ}} + \text{RBW} + k - \text{EIRP}_{\text{КА/ЗССС}} + (P_C - P_N), \quad [\text{дБ/К}], \quad (7)$$

где L – потери в свободном пространстве в направлении ЗС, дБ.

$$L = 92,45 + 20*\lg S + 20*\lg F,$$

где S – наклонная дальность, км;

$$S = 6378*((43,705 - \cos^2 b)^{1/2} - \sin b),$$

где b – угол места ЗС, град.; F – частота приема, ГГц; $L_{\text{АТМ}}$ – потери в атмосфере; k – -28,6 дБВт/Гц – постоянная Больцмана; $\text{EIRP}_{\text{КА/ЗССС}}$ – ЭИИМ КА в направлении ЗС, дБВт; $P_N = P_{\text{Низм}} + \delta$, дБВт. Типичная суммарная поправка $\delta = +1,7$ дБ.

$$P_C - 10*\lg(10^{0,1*(P_C \text{ изм})} - 10^{0,1*(P_N)}), \quad \text{дБВт.}$$

Также при расчете радиолинии «Наземный радиопередатчик – Бортовой приёмник» следует определять дополнительные потери, к которым можно отнести:

– потери, вызванные ошибкой наведения:

$$L_{\text{нав}} = 12 * \left(\frac{\text{APE}}{\text{BW}}\right)^2, \quad (\text{дБ}), \quad (8)$$

где BW – ширина диаграммы направленности антенны, град; APE – ошибка угла наведения, град.

– потери поляризационные [8]:

$$L_{\text{пол}} = -10\log_{10} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \frac{4e_{\text{прд}}*e_{\text{прм}}}{(1+e_{\text{прд}}^2)(1+e_{\text{прм}}^2)} + \frac{(1-e_{\text{прд}}^2)(1-e_{\text{прм}}^2)\cos(2*pol)}{(1+e_{\text{прд}}^2)(1+e_{\text{прм}}^2)} \right] \right), \quad (\text{дБ}), \quad (9)$$

где $e_{\text{прд}}$, $e_{\text{прм}}$ – коэффициент эллиптичности поляризации передающей и приемной антенн; pol – вид поляризации, рад.

Суммарное ослабление радиосигналов в атмосфере вычисляется по формуле [12]:

$$A_t = A_g + \sqrt{(A_r + A_c)^2 + A_s^2}, \quad (\text{дБ}), \quad (10)$$

где A_g – ослабление в атмосферных газах, дБ; A_r – ослабление за счет гидрометеоров, дБ; A_c – ослабление из-за облачности, дБ; A_s – глубина замираний, дБ.

Данная виртуальная лабораторная работа может использоваться для изучения базовых принципов построения систем спутниковой связи, спутников дистанционного зондирования Земли и т.д.

Разработка виртуальных лабораторных работ для изучения радиотехнических дисциплин осуществляется на основе таких изданий Международного союза электросвязи (МСЭ), как «Регламент радиосвязи», справочники по радиоконтролю, рекомендации МСЭ-R, отчеты по регулированию использования радиочастотного спектра и спутниковых орбит.

Технологическая основа. Реализация виртуальной лаборатории основана на базе игрового движка Unity Game Engine [13]. Unity Game Engine – это кроссплатформенная среда разработки компьютерных игр от Unity Technologies. Она позволяет создавать приложения виртуальной реальности, работающие на персональных компьютерах, мобильных устройствах с операционными системами iOS и Android, в интернет-приложениях. Редактор Unity имеет простой Drag&Drop интерфейс, который легко настраивать, состоящий из различных окон, благодаря чему можно производить отладку игры прямо в редакторе. Движок поддерживает два скриптовых языка: C#, JavaScript. Физические расчёты производит физический движок PhysX от NVIDIA.

Разработка виртуальной лабораторной работы. Чтобы разработать данную лабораторную работу были определены наиболее важные моменты, позволяющие понять принцип работы системы радиомониторинга на базе малого космического аппарата (МКА) [14], [15]. Помимо вычислительной части, оказалась важной составляющей и визуализация, так как она является демонстрацией процесса радиомониторинга, позволяющего определять источники радиоизлучения (ИРИ) (рис. 2-5).

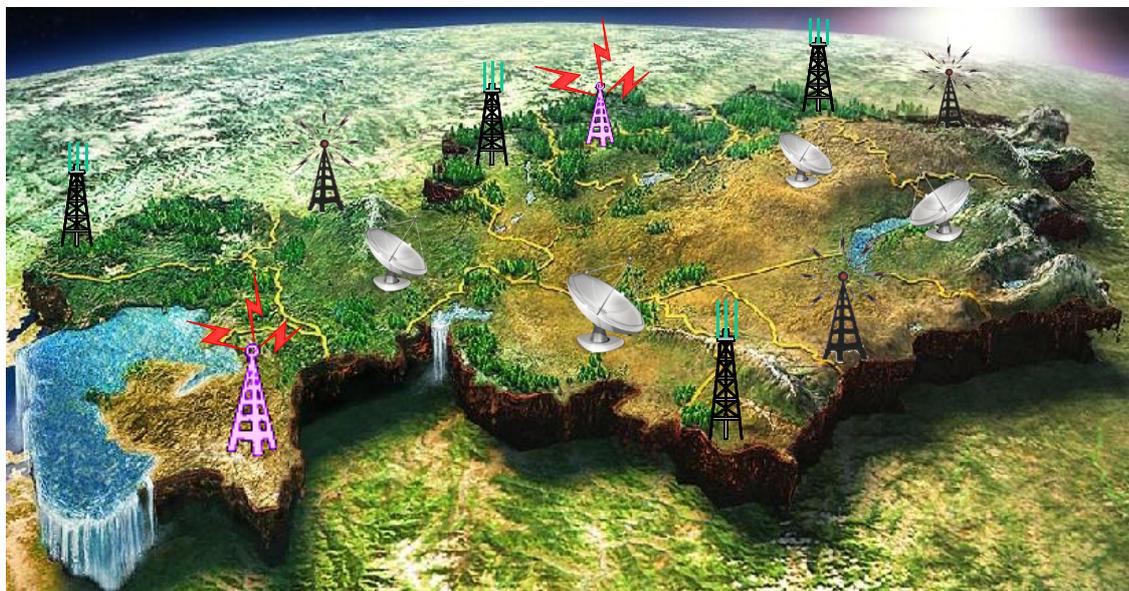


Рисунок 2. Наземные ИРИ различных диапазонов



Рисунок 3. Определения координат ИРИ

В результате был создан шаблон сцены (рис. 4), согласованный с порядком выполнения работы.

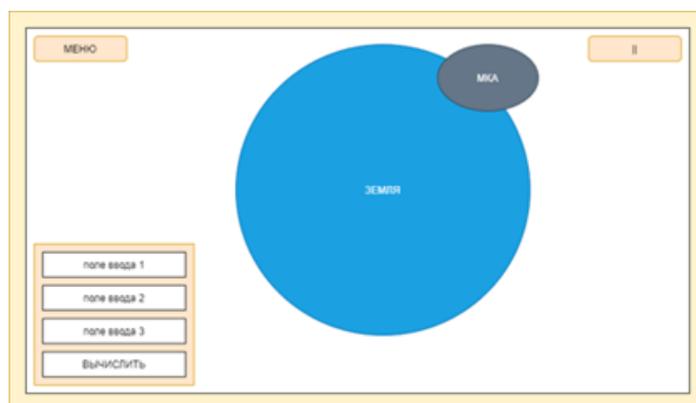


Рисунок 4. Шаблон сцены

Таким образом, работа состоит из двух элементов, важных для пользователя и его понимания работы системы: наблюдение за наземными ИРИ и МКА, и проведение вычислений. Первый был реализован с помощью 3D моделей МКА и Земли, соответствующих реальности. Второй реализован благодаря алгоритму вычислений внутри виртуальной лабораторной работы. Он был разделен на три этапа:

- 1) энергетический расчет для определения уровней сигналов от наземных ИРИ;
- 2) измерение и расчет широты наземного ИРИ;
- 3) измерение и расчет долготы наземного ИРИ.

Выполнение данных расчетов и измерений является последовательным и соответствует порядку выполнения лабораторной работы. Такой подход позволяет сосредоточить внимание обучающихся, ведь переход к каждому последующему шагу подразумевает выполнение предыдущего: например, измерение и расчет долготы наземного ИРИ невозможен без энергетического расчета, а также измерения и расчета широты наземного ИРИ на программном уровне.

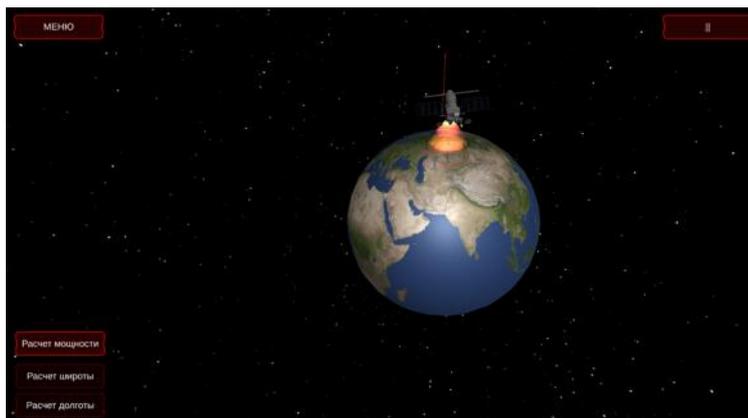


Рисунок 5. Сцена лабораторной работы

Логика приложения была написана на языке C#. Внутри сцены три основных класса: `UIController`, `SceneLogicController` и `CalculationsController`. Первый скрипт – `UIController` отвечает за контроль пользовательского интерфейса, второй – `CalculationsController` реализует производство вычислений, необходимых для работы; третий – `SceneLogicController` контролирует поведение элементов непосредственно самой сцены: Земли, МКА, системы ИРИ, а также взаимодействие между ними и UI.

Таким образом, было разработано приложение для выполнения лабораторной работы, позволяющее изучить принципы работы системы радиомониторинга.

Заключение. В рассматриваемой статье изучен и приведен мировой опыт образования, вместе с новшествами, причиной которых стала пандемия.

Приведен процесс разработки виртуальной работы для изучения работы системы радиомониторинга. В дальнейшем планируется рассмотрение различных систем радиосвязи, по которым будут выполнены новые лабораторные работы. Также будет расширен функционал лабораторной работы, приведенной в статье, для обеспечения пользователей более глубоким пониманием процессов в радиотехнических системах.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке КН МОН РК по программе грантового финансирования научных исследований на 2020-2022 гг., грант №AP08857146.

Список литературы

1. Об усилении мер по недопущению распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в организациях образования, на период пандемии: Приказ Министра образования и науки Республики Казахстан от 1 апреля 2020 года № 123.
2. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза / Б.М. Саданова, А.В. Олейникова, И.В. Альберти [и др.] // Молодой ученый. – 2016. – № 4 (108). – С. 71-74.
3. Вопросы создания виртуальной учебной лаборатории в информационно-образовательной среде технического вуза / В.Д. Марченко, Л.А. Горovenko. // Научный потенциал вуза – производство и образованию. – 2017. – № 2(4).
4. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>, дата обращения 29.04.2021.
5. http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-MICROWAVE-STUDIO.phtml, дата обращения 29.04.2021.
6. <https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software>, дата обращения 29.04.2021.
7. <https://zetlab.com/programmnoe-obespechenie/>, дата обращения 29.04.2021.
8. Антенны и распространение радиоволн: учебник / В.Т. Ерёменко [и др.]. – Орёл: ОГУ имени

- И.С. Тургенева. – 2017. – 329 с.
9. Ерохин Г.А., Мандель В.И., Нестёркин Ю.А., Струков А.П. Методика расчета энергетического запаса радиолинии «космический аппарат – станция» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018, том 5, выпуск 1, с. 65-74.
 10. Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е., Жаксылық А.Ж., Кожаметова Б.А. Оценка энергетического бюджета для системы радиомониторинга на базе низкоорбитальных спутников // Вестник АУЭС. – № 4 (47). – 2019. – С. 88.
 11. Рекомендация МСЭ-R P.453-12. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции // Серия Р. Распространение радиоволн. – 09.2016.
 12. Рекомендация МСЭ-R P.618-12. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля – космос. – 07.2015.
 13. <https://unity3d.com/company>, дата обращения 29.04.2021.
 14. Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е. О применении космических аппаратов в системах радиомониторинга // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – 2019. – Т.6. – С. 49-154.
 15. Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е., Кожаметова Б.А. Вопросы моделирования спутниковой системы мониторинга радиоэлектронных средств // Материалы Республиканской научно-теоретической конференции «СЕЙФУЛЛИНСКИЕ ЧТЕНИЯ – 14: Молодежь, наука, инновации: цифровизация – новый этап развития». – Нур-Султан. – 2018. – Т. 1, ч. 3. – С. 203-205.

References

1. Ob usilenii mer po nedopushcheniyu rasprostraneniya koronavirusnoj infekcii COVID-19 v organizatsiyah obrazovaniya, na period pandemii: Prikaz Ministra obrazovaniya i nauki Respubliki Kazahstan ot 1 aprelya 2020 goda № 123.
2. Primenenie vozmozhnostej virtual'nyh laboratorij v uchebnom processe tekhnicheskogo vuza / B.M. Sadanova, A.V. Olejnikova, I.V. Al'berti [i dr.]. // Molodoy uchenyj. – 2016. № 4 (108). S. 71-74.
3. Voprosy sozdaniya virtual'noj uchebnoj laboratorii v informacionno-obrazovatel'noj srede tekhnicheskogo vuza / Marchenko V.D., Gorovenko L.A. // Nauchnyj potencial vuza - proizvodstvu i obrazovaniyu. – 2017. – № 2(4).
4. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>, data obrashcheniya 29.04.2021.
5. http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-MICROWAVE-STUDIO.phtml, data obrashcheniya 29.04.2021.
6. <https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software>, data obrashcheniya 29.04.2021.
7. <https://zetlab.com/programmnoe-obespechenie/>, data obrashcheniya 29.04.2021.
8. Antenny i rasprostranenie radiovoln: uchebnik / V.T. Eryomenko [i dr.]. – Oryol: OGU imeni I.S. Turgeneva. – 2017. – 329 s.
9. Erohin G.A., Mandel' V.I., Nestyorkin YU.A., Strukov A.P. Metodika rascheta energeticheskogo zapasa radiolinii «kosmicheskij apparat – stanciya» // Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy. – 2018, tom 5, vypusk 1, s. 65–74.
10. Ajtmagambetov A.Z., Kulakaeva A.E., Zhaksylyq A.Zh., Kozhahmetova B.A. Ocenka energeticheskogo byudzheta dlya sistemy radiomonitoringa na baze nizkoorbital'nyh sputnikov // Vestnik AUES. № 4 (47). – 2019, s. 88.
11. Rekomendaciya MSE-R P.453-12. Indeks refrakcii radiovoln: ego formula i dannye o refrakcii. // Seriya P. Rasprostranenie radiovoln. – 09.2016.
12. Rekomendaciya MSE-R P.618-12. Dannye o rasprostranении radiovoln i metody prognozirovaniya, neobhodimye dlya proektirovaniya sistem svyazi Zemlya – kosmos. – 07.2015.
13. <https://unity3d.com/company>, data obrashcheniya 29.04.2021.
14. Ajtmagambetov A.Z., Kulakaeva A.E. O primenenii kosmicheskikh apparatov v sistemah radiomonitoringa // Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2019: sb. tr. II mezhdunar. nauch.-tekhn. foruma: v 10 t. T.6./ pod obshch. red. O.V. Milovzorova. – Ryazan': Ryazan. gos.radiotekhn. un-t. – 2019. Ryazan'. – 218 s., s.149-154.
15. Ajtmagambetov A.Z., Kulakaeva A.E., Kozhahmetova B.A. Voprosy modelirovaniya sputnikovoy sistemy monitoringa radioelektronnyh sredstv // Materialy Respublikanskoj nauchno-teoreticheskoy konferencii «SEJFULLINSKIE CHTENIYA – 14: Molodezh', nauka, innovacii: cifrovizaciya – novyj etap razvitiya». – 2018 g, Tom 1, chast' 3, str 203-205, g. Nur-Sultan.