

УДК: 621.396.946

EDN: [OOSRGM](https://oosrgm.ru)



## Программное обеспечение для расчета энергетического бюджета спутниковой радиолинии

**М.А. Михайлов\***

Южный федеральный университет, ул. Большая Садовая, 105/42,  
Ростов-на-Дону, 344006, Россия

\*E-mail: [mikhailov.maksim.r@mail.ru](mailto:mikhailov.maksim.r@mail.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрены основы построения каналов связи с использованием спутников-ретрансляторов, находящихся на геостационарной орбите, особенности распространения сигналов в спутниковых каналах связи и расчета энергетического бюджета радиолинии. Реализована математическая модель расчета потерь с помощью рекомендаций МСЭ-R (Международный Союз Электросвязи Радиоволн). Разработано ПО (программное обеспечение) для расчета энергетического бюджета спутниковой линии связи на языке программирования C# в среде Microsoft Visual Studio 2019, приведен вид пользовательского интерфейса. Представлен пример расчета бюджета в Ku-диапазоне, а именно: расчет потерь в свободном пространстве, в облаках, тумане, в дожде, в спокойной атмосфере, отношение сигнал/шум на входе приемной земной станции и другие немаловажные параметры. В работе приведена оценка эффективности ПО, согласно полученным практическим и теоретическим результатам. В качестве примера использовался геостационарный спутник Ямал-402.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, энергетический бюджет радиолинии, искусственный спутник земли, земная станция, геостационарная орбита, спутниковая линия связи.

## Software for calculating the energy budget of a satellite radio link

**M.A. Mikhailov\***

Southern Federal University, 105/42 Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-Don, 344006,  
Russia

\*E-mail: [mikhailov.maksim.r@mail.ru](mailto:mikhailov.maksim.r@mail.ru)

**Abstract.** In the work the basics of building communication channels using repeater satellites in geostationary orbit, the peculiarities of signal propagation in satellite communication channels and the calculation of the energy budget of the radio link are considered. Implemented a mathematical model for calculating losses using the recommendations of ITU-R (International Telecommunication Union Radio waves). Software for calculation of satellite communication line energy budget in C# programming language in Microsoft Visual Studio 2019 environment is developed, the user interface view is given. The example of budget calculation in Ku-band is presented, namely: calculation of losses in free space, in clouds, fog, rain, calm atmosphere, signal/noise ratio at the input of the receiving earth station and other important parameters. In the work the evaluation of software efficiency according to the obtained practical and theoretical results is given. The geostationary satellite Yamal-402 was used as an example.

**Keywords:** software, power budget of the radio line, artificial earth satellite, earth station, geostationary orbit, satellite link.

## 1. Введение

На сегодняшний день значительная часть удаленных территорий все еще не покрыта наземными сетями связи, поэтому построение спутниковых линий связи является актуальным для обозначенных условий. Точность определения требований к техническим характеристикам наземного оборудования в конечном итоге определяет стабильность работы канала связи и непосредственно зависит от корректности расчета бюджета радиолинии. В связи с этим разработка ПО для расчета энергетического бюджета является актуальной задачей.

## 2. Цель исследования

Целью данной работы является обеспечение стабильности работы канала связи с учетом предварительного расчета энергетического бюджета.

Для достижения цели поставлены задачи:

1. Изучить теоретических сведений об организации спутниковых линий связи;
2. Реализовать математическую модель расчета потерь с помощью рекомендаций МСЭ-R (Международный Союз Электросвязи Радиоволн);
3. Разработка программного обеспечения спутниковой линии связи с учетом заданной доступности канала;
4. Проведение экспериментальных исследований; а также анализ полученных результатов

## 2. Схема организации

Спутниковая линия связи состоит из двух участков «линия вверх» и «линия вниз».



**Рисунок 1.** Схема организации односторонней спутниковой линии.

Передача сигнала между первой земной станцией и второй осуществляется следующим образом: радиочастотный сигнал, излучаемый передающей антенной, принимается приемной антенной бортовой системы ИСЗ (искусственный спутник земли).

Принятый сигнал усиливается и преобразуется по частоте. Затем обработанный сигнал от передающей земной станции поступает на передатчик и излучается передающей антенной в направлении приемной земной станции.

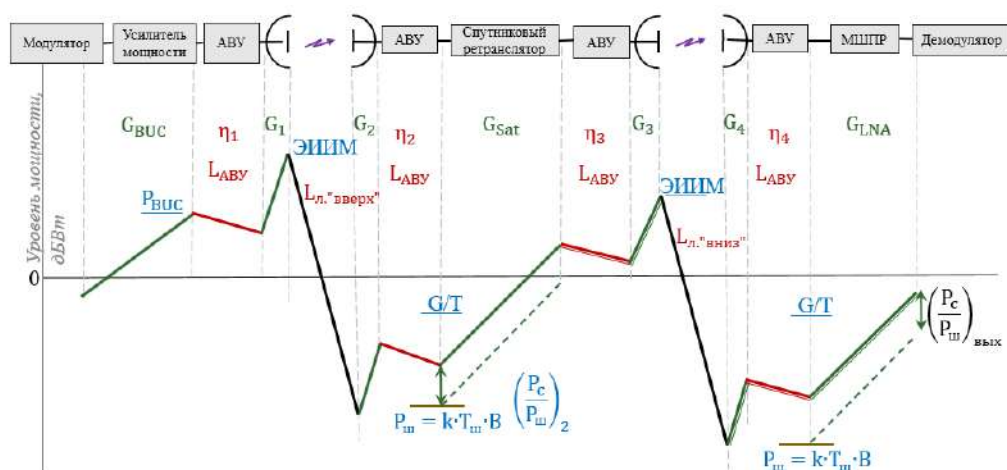
### 3. Рассматриваемые спутники

В данной работе рассмотрены геостационарные спутники, особенность которых является то, что они не меняют своего положения относительно наблюдателя на поверхности Земли. Связь, организуемая через геостационарный спутник, не имеет перерывов в обслуживании, из-за взаимного перемещения спутника и наземной станции.

### 4. Диаграмма уровней мощности сигнала

На рисунке 2 показана диаграмма уровней мощности сигнала на участках линия «вверх» и линия «вниз».

Основной особенностью спутниковой линии является трасса большой протяженности и, соответственно, значительное ослабление сигнала.



**Рисунок 2.** Диаграмма уровней мощности сигнала на участках линия «вверх» и линия «вниз».

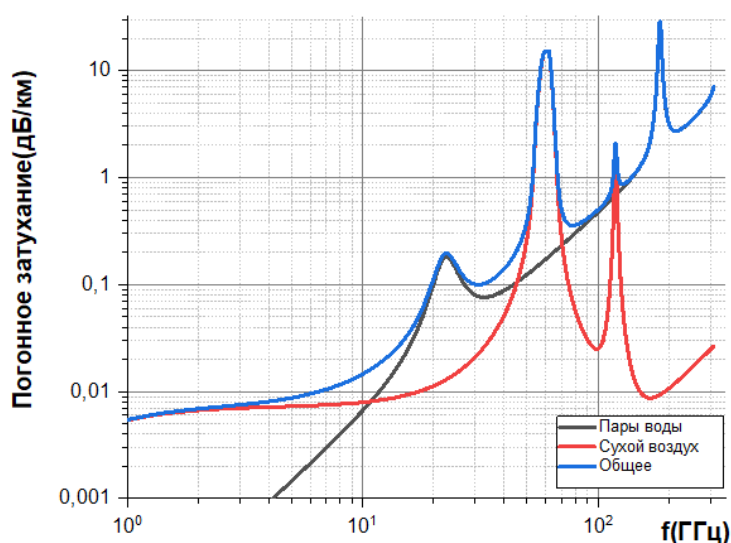
### 5. Основные потери на линиях «земля-спутник» и «спутник-земля»

Ослабление сигнала на линии вверх или вниз обусловлено затуханием в свободном пространстве, в атмосфере, в дожде и в облаках.

Ослабление сигнала в облаках, тумане и дожде зависит от географического положения приемной и передающей земных станций, а также носит статистический характер.

Основной вклад в затухание сигнала вносят потери в свободном пространстве, обусловленные значительным расстоянием между ЗС (земная станция) и ИСЗ.

Так, при высоте искусственного спутника земли 40 тысяч км затухание сигнала на трассе может достигать 200 дБ [1].



**Рисунок 3.** Погонное затухание за счет атмосферных газов.

Существенный вклад в ослабление сигнала в атмосфере вносят кислород и водяные пары. Величина затухания составляет по от 0,3 до 2 дБ. Алгоритм расчета ослабления приведен в рекомендациях МСЭ-R 676-6 [2].

Влияние водяных облаков и тумана невелико из-за малого размера капель воды (диаметр около 0,01 см). Тем не менее, нельзя пренебрегать этим фактором на частотах около 30 ГГц. Расчет ослабления представлен в МСЭ-R P.840-5 [3]. По величине данные потери составляют от 0 до 1 дБ.

Наиболее существенная составляющая ослабления радиосигнала в атмосфере – затухание в дожде. Затухание определяется интенсивностью дождя (мм в час), пространственным расположением дождевой зоны, используемым частотным диапазоном и многими другими факторами. Расчет ослабления представлен в МСЭ-R P.838-3 [4]. Высота дождевой зоны берется из полученных статистических данных МСЭ-R P.839-4 [5]. По величине данные потери составляют от 0 до 16 дБ.

## 6. Полученные результаты

На основе математических выкладок, представленных в рекомендациях, было разработано специальное программное обеспечение, пользовательский интерфейс которого, представлен на слайде. Слева расположены параметры передающей ЗС, ниже параметры сигнала, затем параметры спутника, параметры на приеме ЗС, а также расчет бюджета

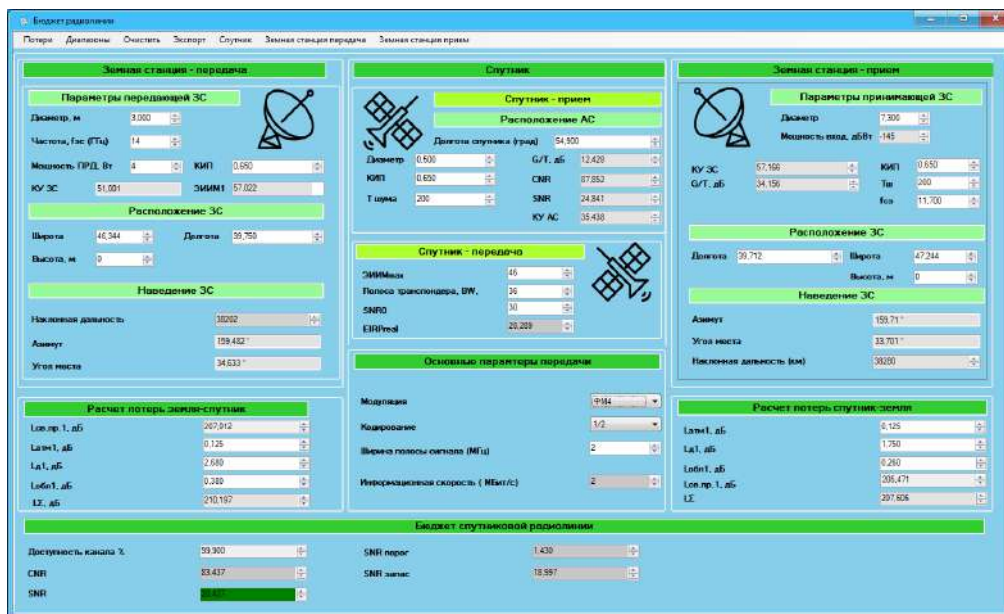


Рисунок 4. Интерфейс разработанного программного обеспечения.

Для проверки правильности работы программы были проведены специальные экспериментальные исследования.

Расчет бюджета был проведен для двух антенных систем, расположенных в городе Ростове-на-Дону, мощность передатчика для обоих случаев равняется 4 Вт. Использовался Ku диапазон. В качестве первой взята приемная антенна диаметром 1.8.

Для нее SNR (Signal-to-Noise Ratio – отношение сигнал/шум), согласно теории, составляет 5.26 дБ. На практике получено значение 5.27 дБ. Разница между теоретическими и практическими сведениями составляет 0.075 дБ.

Таблица 1. Экспериментальные данные для приемной антенны диаметром 1.8 м.

	Теория	Практика
SNR <sub>вх</sub> (дБ)	20.409	20.334

Результат данного программного обеспечения заключается в том, что оно показывает отношение сигнал/шум на входе приемной станции, учитывая потери и тем самым для выбранной сигнально кодовой конструкции определяет работоспособность канала связи со всеми указанными параметрами. Ведь SNR– это удобный критерий качества для аналоговых систем связи [6].

Также была рассмотрена АС (антенная система) ЗС на приеме диаметром 7.3 м.

Для нее SNR, согласно теории, составляет 8.248 дБ. На практике получено значение мощности 8.125 дБ. Разница между теоретическими и практическими сведениями составляет 0.123 дБ.

**Таблица 2.** Экспериментальные данные для приемной антенны диаметром 7.3 м.

	Теория	Практика
SNR <sub>вх</sub> (дБ)	8.248	8.125

Результаты эксперимента сходятся с практикой.

## 7. Выводы

Изучены теоретические сведения об организации спутниковой линии связи и методику расчета энергетического бюджета спутниковой радиолинии. Изучена модель расчета ослабления в соответствии с рекомендациями МСЭ-R. Разработано программное обеспечение для расчета, позволяющее корректно и быстро выполнять расчет энергетического бюджета для конкретной географ. точки. На основе проведенных экспериментальных исследований и полученных результатов было установлено, что расчетные значения SNR совпадают с измеренными для АС1.8 и АС7.3.

Из рекомендаций МСЭ-R воспроизведены математические модели расчета потерь в атмосфере, в дожде и из-за облачности. Следовательно, при расчете энергетического бюджета спутниковых линий связи «вверх» и «вниз» учтены неблагоприятные условия, которые при распространении.

## Список литературы

1. Сомов, А. М. Спутниковые системы связи: Учеб. пособие для вузов / А. М. Сомов, С. Ф. Корнев. – М: Горячая линия – Телеком, 2015. – 456 с.
2. Рекомендация МСЭ-R Р.676-6. Затухание в атмосферных газах. – 2005. – 23 с.
3. Рекомендация МСЭ-R Р.840-5. Ослабление из-за облачности и тумана. – 2012. – 10 с.

4. Рекомендация МСЭ-R P.838-3. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования. – 2005. – 9 с.
5. Рекомендация МСЭ-R P.839-4. Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования. – 2013. – 3 с.
6. Скляр, Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. Под ред. А. В. Назаренко. – М: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.