

УДК 681.3.07

## **Программа имитационного моделирования цифровых радиолиний передачи данных**

И.В.Козлов, С.А. Набоков, А.С. Смирнов

### **Аннотация**

Разработаны алгоритмы, программные модули и интерфейсная среда для моделирования процессов передачи информации в аэромобильных цифровых радиолиниях связи. Реализованы процедуры анализа энергетического потенциала в тропосферных линиях связи с учетом интерференционного взаимодействия распространяющихся волн с волнами, отраженными от подстилающей поверхности. Разработаны модели форматирования сигнала видеоизображения, модуляции несущей частоты, пространственного канала связи, приемной и передающей антенн, цифрового демодулятора, а также систем отображения принимаемого сигнала на экран ЭВМ с учетом шумов. Проводится оценка отношения сигнала к шуму путем прямого сравнения исходного изображения объекта с изображением, полученным в результате симуляционного моделирования.

**Ключевые слова:** радиолиния связи; имитационное моделирование.

### **Введение**

При создании самолетных и аэрокосмических систем связи и передачи данных радиолокационного наблюдения объектов возникает необходимость наглядной симуляции результатов трансляции информационного потока в радиолинии при анализе штатных и нештатных летных ситуаций. Благодаря успехам в области совершенствования средств вычислительной техники в сторону кардинального повышения производительности работы центральных процессоров и возможности распараллеливания вычислений, а также дальнейшего развития алгоритмической базы появилась возможность моделирования сложных процессов, происходящих не только в отдельных элементах радиоэлектронной аппаратуры, но также в крупных блоках и комплексах. Цель проведенных исследований —

разработка алгоритмов, программных модулей и интерфейсной среды для сквозного моделирования процессов передачи сигнала в цифровых аэрокосмических радиоперелиниях связи с использованием языка C++.

### Меню пользователя программы

В разработанной программе, предназначенной для моделирования передачи изображения в цифровой радиоперелинии связи, реализованы алгоритмы расчета энергетического потенциала [1—5] и графического представления последующего влияния канала на передаваемую информацию. Меню программы (рис. 1) содержит 3 вкладки. Первые две предназначены для ввода и редактирования всех требуемых параметров модели, а также для отображения результатов вычислений соответствующих характеристик. Третья вкладка предназначена для частичной автоматизации процесса ввода исходных параметров системы. Далее рассмотрим более подробно каждую из них.

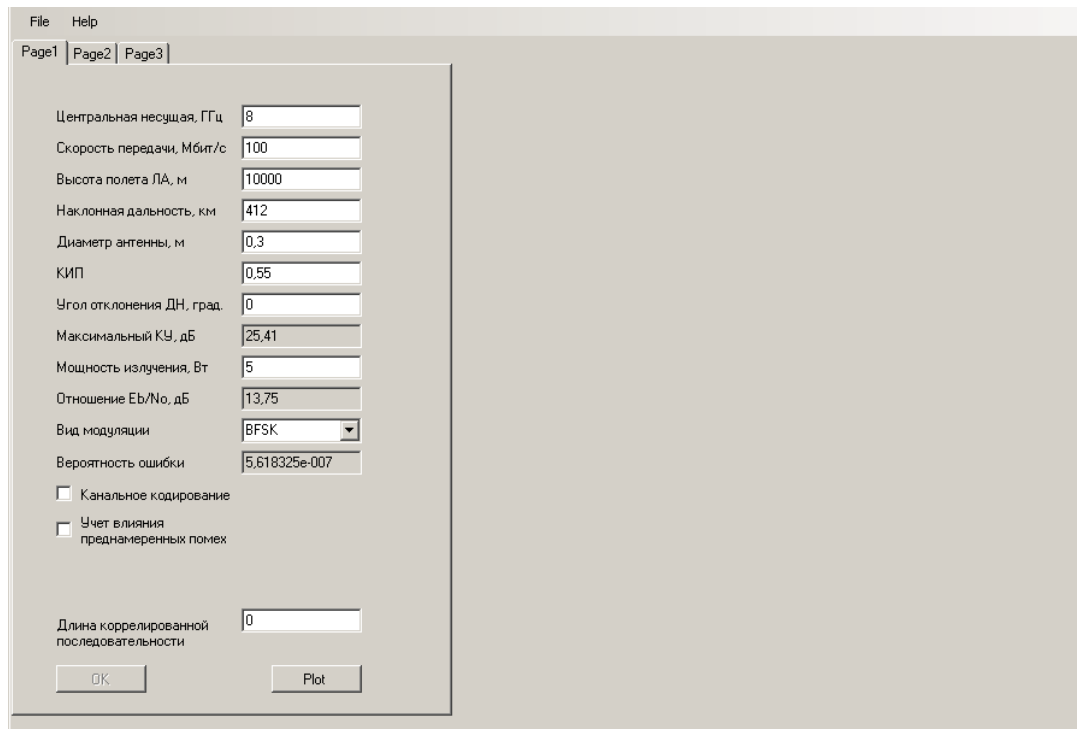


Рисунок 1 - Внешний вид окна программы

#### Вкладка «Page1»

На первой вкладке (рис. 2 а и б) представлены наиболее часто редактируемые параметры передающего устройства. Среди них: центральная частота (ГГц), скорость передачи (Мбит/с), высота полета летательного аппарата ЛА (м), наклонная дальность (км), диаметр антенны (м), коэффициент использования площади антенны, угол отклонения диаграммы направленности от линии визирования (град), мощность излучения (Вт), вид

модуляции. Ввод параметров осуществляется, последовательно, начиная с первого, а их дальнейшее редактирование возможно в произвольном порядке. При этом осуществляется проверка на допустимость введенного значения, для чего ввод необходимо подтвердить нажатием клавиши «Enter».

Расчет и вывод полученных результатов осуществляются автоматически по мере задания требуемых параметров. После ввода высоты полета ЛА производится расчет максимальной наклонной дальности, и полученное значение выводится в поле «Наклонная дальность, км» в качестве максимально допустимого входного параметра, с которым можно согласиться, либо изменить его. В случае недопустимого значения выводится предупреждающее сообщение (т.к. в модели рассматривается передача сигнала на расстояние, которое не превышает зоны прямой видимости объектов). Выходные характеристики: коэффициент усиления антенны в максимуме диаграммы направленности (дБ), отношение сигнала к шуму  $E_b/N_0$  (дБ), вероятность ошибки. При вводе вида модуляции предлагается сделать выбор из четырех вариантов: бинарная частотная - BFSK, бинарная фазовая - BPSK, квадратурная частотная - QFSK, квадратурная фазовая - QPSK.

Figure 2 shows two screenshots of the software interface for the 'Page1' tab. Both screenshots display a list of parameters for a communication system simulation. The parameters include carrier frequency, transmission rate, flight altitude, slant range, antenna diameter, antenna gain, antenna tilt angle, maximum antenna gain, transmitted power, energy per bit to noise power spectral density ratio, modulation type, bit error rate, channel coding, and interference consideration. In screenshot (a), the modulation type is BFSK and the bit error rate is 8.135032e-008. In screenshot (b), the 'Учет влияния преднамеренных помех' (Interference consideration) checkbox is checked, and the interference type is set to 'узкополосный' (Narrowband). The bit error rate in (b) is 4.366094e-004.

а) б)  
Рисунок 2 - Внешний вид меню вкладки «Page1» а) и б)

Дополнительные параметры: канальное кодирование, учет влияния преднамеренных помех. Для доступа к настройкам дополнительных параметров используются соответствующие флажки-переключатели, выдающие результат «включен/выключен»,

работа которых сигнализируется появлением маркера. При этом предполагается, что эти параметры взаимно исключают друг друга, и по этой причине их одновременное использование невозможно. На решение применить «Канальное кодирование» (рис 2 а), справа появляется выпадающее меню, где предлагается осуществить выбор между кодами Хемминга (7,4), (15,11) и (31,26). После чего будет произведен автоматический пересчет вероятности битовой ошибки, а результирующее значение отображается в поле вывода «Вероятность ошибки». Возможность учета влияния преднамеренных помех ограничена двоичными видами модуляции (BFSK, BPSK), для других видов данный пункт становится недоступным. На решение выполнить «Учет влияния преднамеренных помех» (рис 2 б), справа появляется выпадающее меню, где предлагается осуществить выбор между: широкополосный шум, узкополосный шум (для BFSK) и широкополосный шум, импульсные помехи (для BPSK). После выбора вида помехи ниже появляются два поля ввода дополнительных параметров: для случая широкополосного шума – мощность полученных помех, дБ и коэффициент расширения спектра сигнала; для случая узкополосного шума и импульсных помех – коэффициент превышения помехи над шумом и коэффициент полосы помехи. После ввода требуемых параметров будет произведен автоматический пересчет вероятности битовой ошибки, а результирующее значение отображается в поле вывода «Вероятность ошибки». В случае снятия флажка с какого-либо из дополнительных параметров происходит автоматический возврат к основным параметрам с обновлением поля вывода «Вероятность ошибки».

Дополнительный параметр длина коррелированной последовательности отвечает за группу пикселей, на которые распространяется текущее значение цвета ошибочного пикселя и не влияет на предшествующие расчеты, а только вносит соответствующие изменения в изображение (более подробно рассматривается в пункте «Алгоритм обработки изображения»).

По окончанию расчетов появляется возможность построения графика зависимости  $E_b/N_0$  от наклонной дальности, при помощи кнопки «Plot», которая становится активной. График отображается в правом нижнем углу окна программы. Кнопка «ОК» отвечает за выполнение алгоритма по обработке изображения (на котором более подробно остановимся ниже) и становится активной после чтения файла с изображением.

#### *Вкладка «Page2»*

На второй вкладке (рис. 3 а) представлены следующие параметры: высота приемной антенны (м), высота неровностей поверхности (м), тип поляризации волны, потери

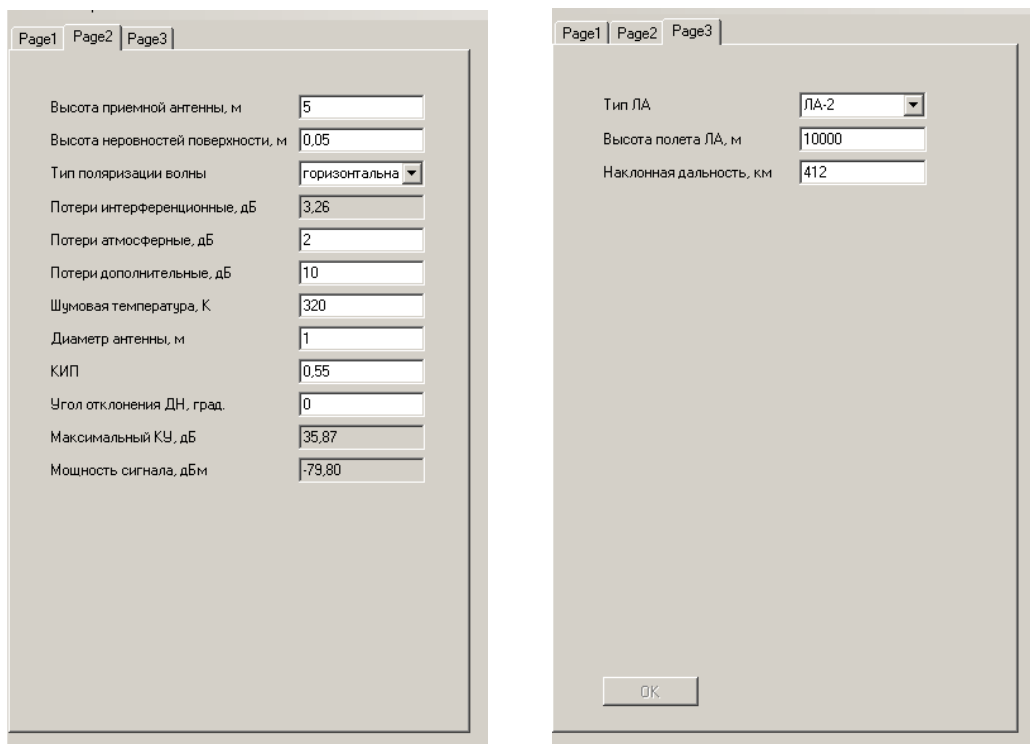
атмосферные (дБ), дополнительные потери (дБ), шумовая температура (К), диаметр антенны приемника (м), коэффициент использования площади антенны, угол отклонения диаграммы направленности от линии визирования (град). Выходные характеристики: потери интерференционные (дБ), максимальный коэффициент усиления (дБ), мощность сигнала (дБм). Допустимые значения пункта «тип поляризации волны»: вертикальная, горизонтальная.

В данном случае предполагается, что ввод параметров происходит автоматически после следующих возможных действий: после ввода значения в поле «Центральная несущая, ГГц» (вкладка «Page1») или после выбора типа летательного аппарата в поле «Тип ЛА» (вкладка «Page3»). Пользователю предоставляется лишь возможность последующего их редактирования, при этом не осуществляется какой-либо проверки на правильность введенных значений (разрешается использование только числовых значений, а в качестве разделителя применяется запятая).

#### *Вкладка «Page3»*

На рис. 3 б приведен вид вкладки «Page3». Информативность данной вкладки значительно снижена за счет того, что практически все параметры с вкладок «Page1» «Page2» объединены в один пункт «Тип ЛА», после обращения, к которому осуществляется их автоматическое заполнение. Информация о параметрах содержится в дополнительных файлах: la1.dat, la2.dat, la3.dat (для «Page1») и tp.dat (для «Page2»). Далее более подробно остановимся на структуре этих файлов.

Структура файла с именем «la№» (№ – порядковый номер типа летательного аппарата) имеет вид вектора размерностью 8 элементов: 1) центральная частота, 2) скорость передачи, 3) диаметр антенны, 4) коэффициент использования площади антенны, 5) угол отклонения диаграммы направленности от линии визирования, 6) мощность передатчика, 7) вид модуляции (допустимые значения: «0» – BFSK, «1» – BPSK, «2» – QFSK, «3» – QPSK), 8) канальное кодирование (коды Хемминга: «0» – кодирование отсутствует, «1» – (7,4), «2» – (15,11), «3» – (31,26)). Структура файла с именем «tp» имеет вид вектора размерностью 9 элементов: 1) высота приемной антенны, 2) высота неровностей поверхности, 3) тип поляризации волны (допустимые значения: «0» – вертикальная, «1» – горизонтальная), 4) потери атмосферные, 5) потери дополнительные, 6) шумовая температура, 7) диаметр антенны, 8) коэффициент использования площади антенны, 9) угол отклонения диаграммы направленности от линии визирования.



а) б)  
 Рисунок 3 - Внешний вид меню вкладки «Page2» а) и «Page3» б)

Параметры: «высота полета ЛА, м» и «наклонная дальность, км», а также кнопка «ОК» аналогичны соответствующим элементам меню вкладки «Page1» и были рассмотрены выше. Таким образом, реализован вариант меню, предусматривающий минимизацию вводимых пользователем данных, за исключением параметра «учет влияния преднамеренных помех», управление которым возможно осуществлять только с вкладки «Page1».

Функции расчета энергетического потенциала представлены в заголовочных файлах *nrgfunc.h*, *errfunc.h*. Алгоритм взаимодействия параметров меню приводится на рис. 4.

### Алгоритм обработки изображения

В программе предусмотрена работа с растровым изображением, характеризующимся 8-битной градацией цвета, следующих стандартных форматов: *bmp*; *jpg*; *png*; *tif*; *gif*. Специальных ограничений на размеры не предъявляется (но при этом предполагается, что для лучшей визуализации «объем изображения» по возможности должен превышать величину обратно пропорциональную вероятности ошибки). Чтение изображения осуществляется из файла посредством обращения к пункту меню [*File*] - [*Open*].

Принимая во внимание особенности решаемой задачи, а именно, учитывая малую вероятность возникновения ошибки бита, в программе были реализованы алгоритмы работы с изображением, где используются координаты отдельного пикселя. При этом в том случае,

когда вероятность стремится к единице, быстродействие данных алгоритмов несколько снижается. Обработка осуществляется при помощи стандартных функций *GetPixel()* и *SetPixel()*, которые позволяют извлечь и внести соответственно информацию о красной, зеленой и синей (RGB) составляющих цвета пикселя с указанием его координат. Таким образом, управление параметрами пикселя сводится к задаче определения его координат и цветности. Так как рассматривается черно-белое изображение с оттенками серого, то учитывается одна из трех составляющих цвета, в то время как остальные полагаются идентичными.

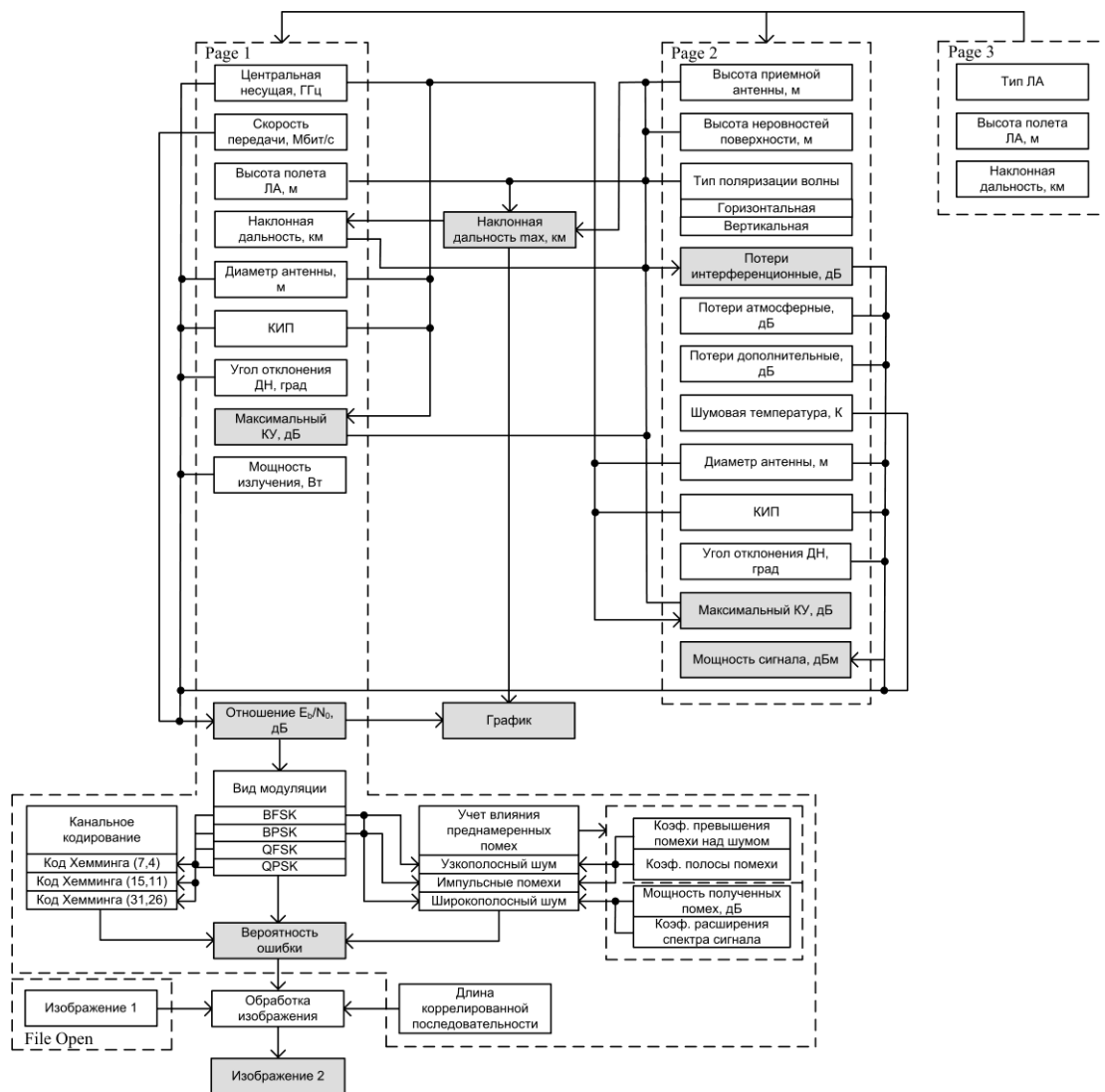


Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма взаимодействия элементов панели управления

При помощи генератора случайных чисел с заданной вероятностью формируется случайная двоичная последовательность, длина которой определяется размерами и цветностью изображения. Таким образом, на битовом уровне представления моделируется помеха.

Весь процесс обработки осуществляется в цикле, а именно: генерируется случайное число в диапазоне от 0 до 1, осуществляется его сравнение с рассчитанной ранее вероятностью, в результате чего формируется двоичная единица (лог. 0 соответствует возврат к началу цикла, лог. 1 – продолжение), рассчитываются координаты и цвет пикселя, производится учет соответствующих изменений, изображение выводится на экран. В модуле также предусмотрен режим учета взаимной корреляции пикселей в виде строки заданной длины, при этом предполагается, что ошибка одного пикселя влечет за собой аналогичную ошибку в группе пикселей. На рис. 5 представлены результаты моделирования с различными значениями параметра «Длина коррелированной последовательности». На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма обработки изображения.

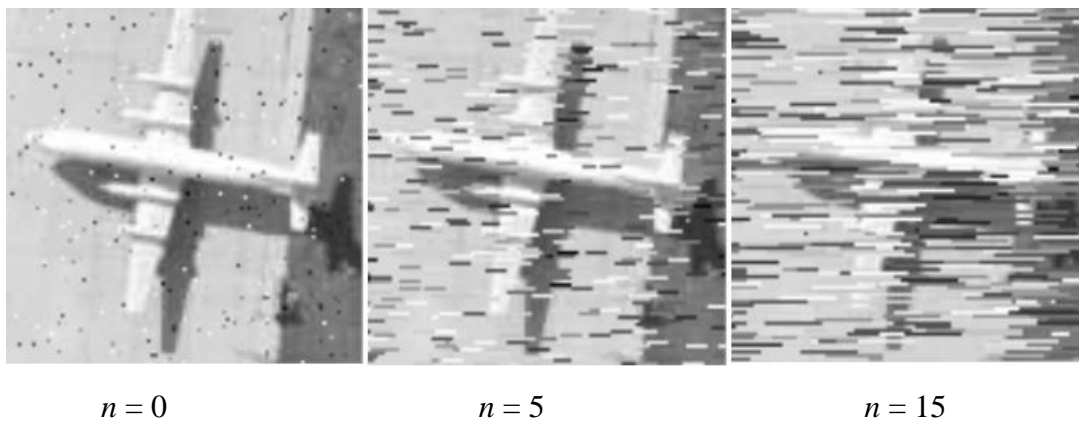


Рисунок 5 - Результаты моделирования для различных значений длины коррелированной последовательности ( $n$ ) при вероятности появления ошибки  $p = 7,4 \times 10^{-3}$

Разработанная программа позволяет провести расчет основных характеристик цифровой радиолинии, а также получить визуальное представление об их влиянии на качество передаваемого изображения. На рис. 7 и 8 представлены результаты моделирования. При повторном нажатии кнопки «ОК» изображение формируется заново, т.е. для одной и той же вероятности ошибки можно получить различные варианты появления ошибочных пикселей на изображении.

Меню программы, а также часть алгоритмов по обработке изображения были реализованы в среде .NET Framework.



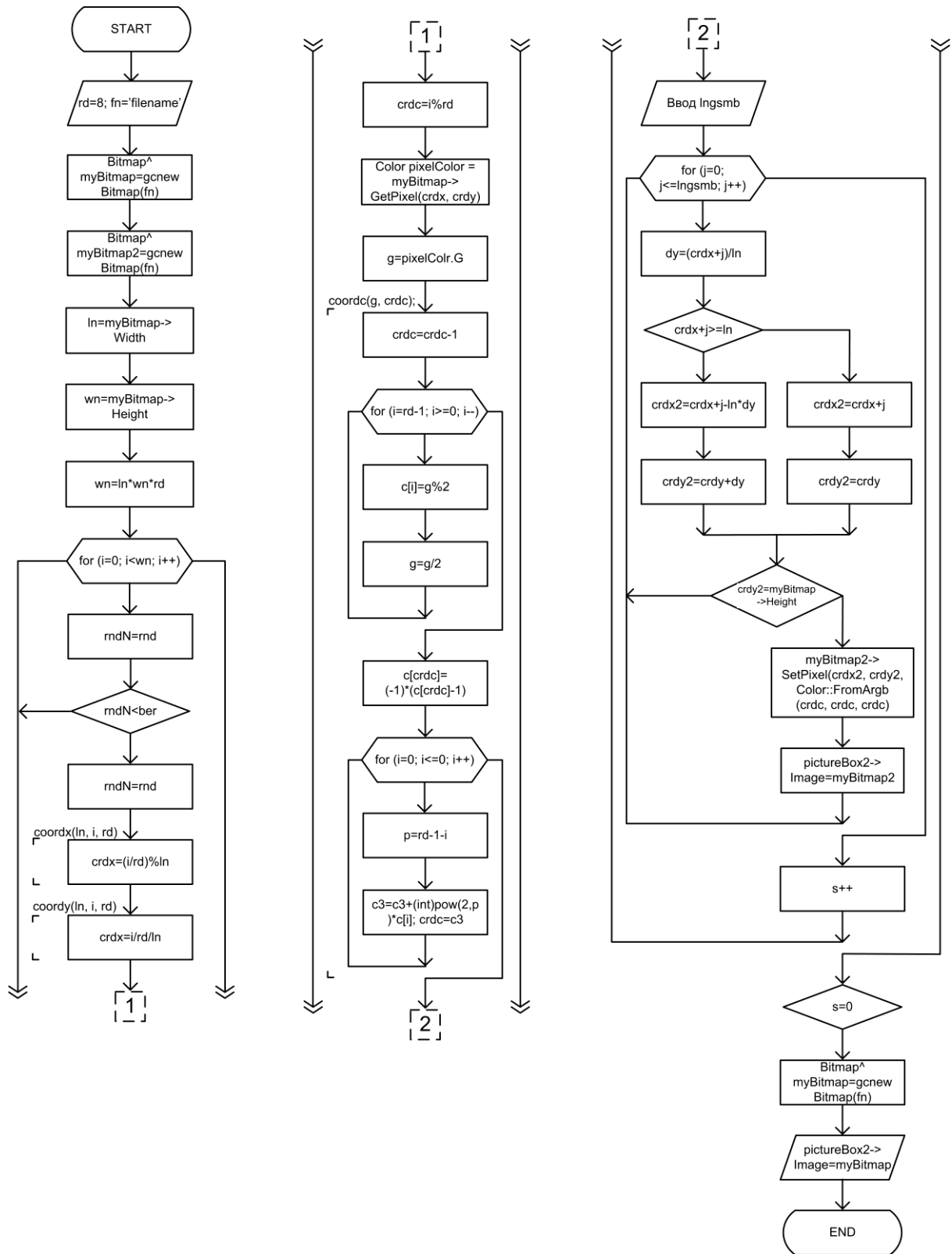


Рисунок 6 - Блок-схема алгоритма обработки изображения

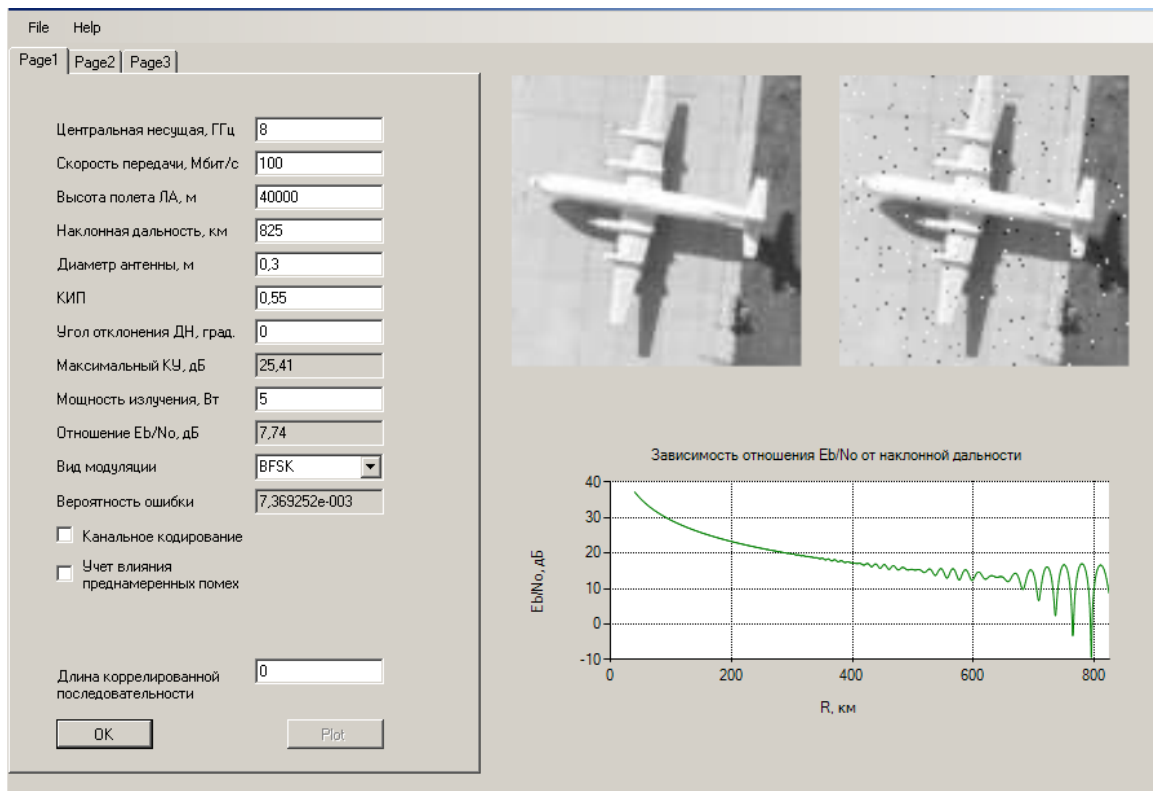


Рисунок 7 - Результаты работы программы при длине последовательности коррелированных ошибок, равной 0

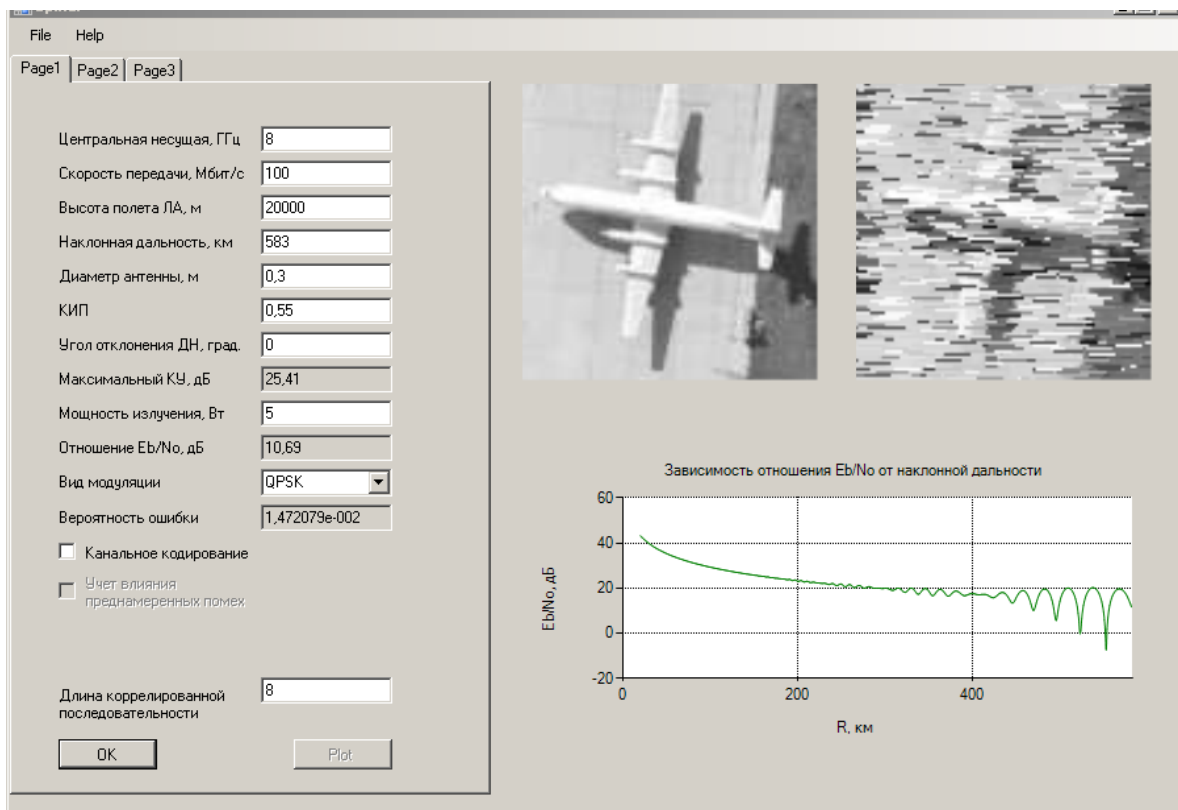


Рисунок 8 - Результаты работы программы при длине последовательности коррелированных ошибок, равной 8

## Заключение

Разработанная система моделирования цифровых радиолиний связи позволяет быстро оценивать их многие важные количественные характеристики, и дает полезные наглядные визуальные образы о качестве процессов, проходящих при передаче видеоинформации. Параметры моделируемой системы управляются с помощью экранного меню, позволяющего изменять тип модуляции сигнала, выбирать вид помехоустойчивого кодирования, задавать значения несущей частоты радиосигнала, мощность передатчика, расстояние между объектами связи, угловую точность взаимного наведения антенн приемника и передатчика и их коэффициенты усиления, и ряд других. Имеется возможность учета влияния преднамеренных помех в виде широкополосного и узкополосного шума. Программа введена в промышленную эксплуатацию и является частью комплекса имитационного моделирования систем воздушного дистанционного зондирования объектов. Указанные возможности и пользовательские особенности программы делают ее полезным инструментом при системотехническом проектировании аэромобильных комплексов связи и управления.

## Литература

1. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.
2. *Спутниковая связь и вещание: Справочник / Бартенев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др; Под ред. Л.Я. Кантора.*— М.: Радио и связь, 1997. — 528 с.
3. *Смирнов А.С., Паркачев Л.А., Петров А.С.* Прием в несанкционированной пространственной области сигнала, излучаемого аппаратурой спутника, вращающегося вокруг земли по эллиптической орбите // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2006, т.11, №10.— с.32 - 37.
4. *Петров А.С., Павленко Г.П.* Энергетика цифровой радиолинии связи и определение параметров антенных устройств с помощью мультипликативных коэффициентов // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2006, т. 11, № 3. - с. 106–108.
5. *Смирнов А.С.* Расчет энергетического потенциала цифровой линии связи между наземной станцией и спутником, вращающимся вокруг Земли по эллиптической орбите. - «Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем», сборник научных трудов каф. РТУиС / Под ред. Кечиева. Л.Н. - М.:МИЭМ, 2006.- с. 124 - 129.

## **Сведения об авторах**

Козлов Игорь Владимирович, инженер ОАО НПК НИИДАР;  
e-mail:egl44@rambler.ru

Набоков Сергей Алексеевич, инженер ФГУП ГосНИИАС  
e-mail:realgood@inbox.ru

Смирнов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник, ОАО НПК НИИДАР, к.т.н.,  
e-mail: leafs@nm.ru