

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ВЫБОРА  
РЕЖИМА РАБОТЫ В РАДИОЛИНИИ, ОБРАЗОВАННОЙ  
МАЛОГАБАРИТНЫМИ СТАНЦИЯМИ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ**

**PROPOSALS FOR THE IMPLEMENTATION OF AN ALGORITHM  
FOR SELECTING AN OPERATING MODE IN A RADIO LINK FORMED  
BY SMALL-SIZED TROPOSPHERIC COMMUNICATION STATIONS**

*Н.Н. Плотников*

*N.N. Plotnikov*

*310 военное представительство МО РФ, ВАС им. С.М. Буденного*

Выбор оптимального режима работы для радиопередающих средств в радиолинии, является важной задачей, в части обеспечения необходимых показателей качества и надёжности связи. Выбор режима работы, может осуществляться исходя из различных критериев, однако очевидно, что чем больше критериев, на основании которых осуществляется выбор, тем более точен выбор. В статье рассматривается вариант реализации в малогабаритной станции тропосферной связи устройства «контроллера режима работы» (КРР), обеспечивающего выбор рабочего режима в зависимости от изменения состояния канала связи. Известно, что изменения состояния канала тропосферной связи носят случайный характер, поэтому критериями, на основании которых осуществляется выбор режима работы в КРР выбраны значения текущих отношения сигнал/шум и вероятности ошибочного приёма.

**Ключевые слова:** тропосферная связь, станции тропосферной связи, контроллер режима работы, отношение сигнал/шум, вероятность ошибочного приёма, функция качества, микроконтроллер.

The choice of the optimal mode of operation for radio transmission facilities in a radio link is an important task in terms of ensuring the necessary quality and reliability of communication. The choice of the operating mode can be carried out on the basis of various criteria, however, it is obvious that the more criteria on the basis of which the choice is made, the more accurate the choice. The article discusses a variant of implementation in a small-sized tropospheric communication station of a «operating mode controller» (OMC) device, which provides the choice of an operating mode depending on the change in the state of the communication channel. It is known that changes in the state of the tropospheric communication channel are of a random nature, therefore, the criteria based on which the choice of the operating mode in the OMC is made are the values of the current signal-to-noise ratio and the probability of erroneous reception.

**Keywords:** tropospheric communication, tropospheric communication stations, operating mode controller, signal-to-noise ratio, probability of erroneous reception, quality function, microcontroller.

## Введение

Особенности распространения радиоволн в каналах тропосферной связи описаны в [1, 2], методики расчёта радиорелейных и тропосферных линий представлены в [3, 4]. Характеристики данных каналов изменяются в очень широком диапазоне [5], следовательно, имеется большое число разновидностей каналов от наиболее благоприятного до наихудшего. Существует множество моделей, описывающих каналы с переменными параметрами [6, 7]. Многолучевые каналы с памятью и с переменными параметрами описаны в [8]. Статистическое описание модели тропосферного канала приведено в [9]. Обилие каналов тропосферной связи и случайный характер изменения их характеристик, предполагают наличие в станциях тропосферной связи специального назначения устройства отвечающего за выбор оптимального режима работы, позволяющего обеспечить необходимые показатели качества связи во время всего сеанса, независимо от изменений характеристик канала. Очевидно, что порядок следования режимов меняется в зависимости от характера многолучевости. Для реализации данного устройства необходимо сформулировать обобщенный алгоритм, в соответствии с которым устройство, управляющее выбором режима работы, будет осуществлять, как выбор самого режима работы, так и его переменные характеристики, из которых он формируется, а также определить требования к аппаратной платформе для интеграции устройства в станцию тропосферной связи.

### Обобщённый алгоритм функционирования контроллера режима работы

Поскольку имеется большое число разновидностей каналов от наиболее благоприятного до наихудшего, то необходимо сформулировать обобщенный алгоритм, в соответствии с которым контроллер режима работы (КРР) должен переключать режимы работы. Порядок следования режимов меняется в зависимости от характера многолучевости. Для наиболее объективной оценки целесообразно рассмотреть наихудший и наилучший каналы.

В [10] сформулированы переменные параметры, которые формируют режим работы —

это кратность модуляции (относительная фазовая модуляция (ОФМ) — 2, 4, 8), скорость кода (1; 0,5; 0,25) и число субполос (20 из которых 16 рабочих и 4 запасных). Там же предложена методика расчёта скоростей передачи информации, которые позволяют обеспечить режимы работы с различными переменными значениями вышеуказанных характеристик. Исходя из расчётов, полученных при помощи [10], установлено, что соединения в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) возможно при значении отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio SNR) от 4–6 дБ. Измерения показывают, что при улучшении сигнала происходит увеличение кратности модуляции и повышение скорости помехоустойчивого кодирования и, только потом, увеличение числа рабочих субполос (рис. 1, 2). Представленные на рисунках поверхности дискретны. По данным рис. 1 можно сделать вывод, что часть режимов, требующих отношения SNR более 24 дБ не реализуемы. Увеличение числа используемых субполос не позволяет использовать модуляцию высоких кратностей и высокоскоростные коды. Рис. 2 показывает возможность реализации различных режимов работы, обеспечивающих приблизительно одинаковые скорости. Однако режимы, требующие использования малого числа полос, являются более устойчивыми. В верхней левой части графика находятся режимы, не реализуемые в диапазоне SNR.

В канале с замираниями имеет место сильное размытие сигнальных точек на фазовой плоскости даже при высоких отношениях SNR. Рост требуемого SNR при увеличении кратности модуляции и скорости кодирования идет более круто (рис. 2). Это меняет приоритеты управления режимами при возможности увеличения скорости. В первую очередь происходит увеличение числа рабочих субполос и только затем — повышение скорости кодирования и увеличение кратности модуляции.

Процедура формирования и приёма сигнала должна обеспечивать формирование в перемежителе информационных пакетов, соответствующих форматам реализуемых рабочих режимов. Предлагается использовать 16 рабочих режимов. Например, в рабочем режиме (4; 0,5; 6) [10] перемежитель в каждом цикле передачи должен забрать от источника сообщений пакет

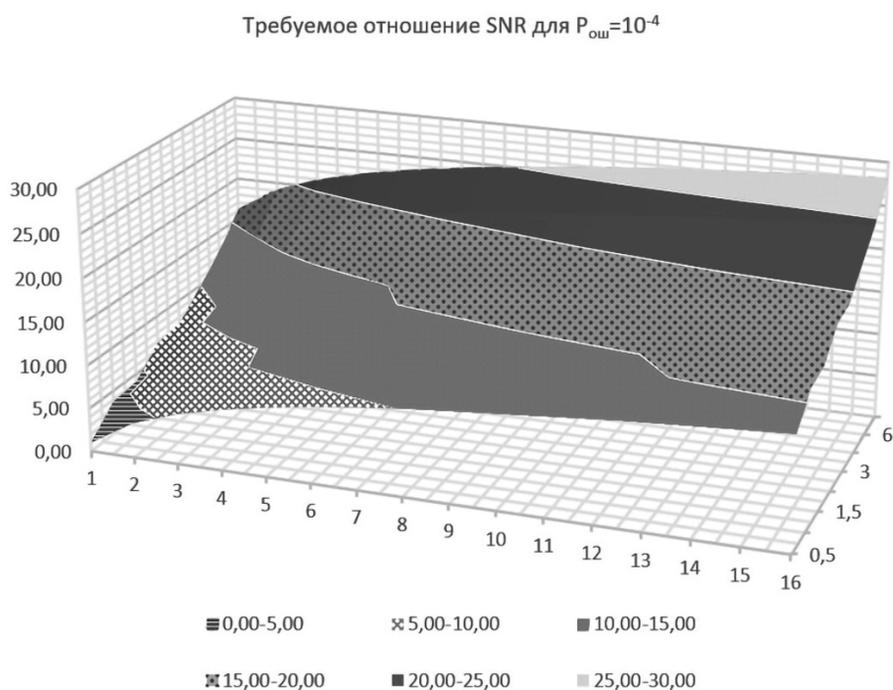


Рис. 1. Зависимость требуемого SNR в канале с АБГШ от числа субполос (ось  $x$ ) и ранжированным по скорости передачи в одной субполосе режимам работы (ось  $y$ )

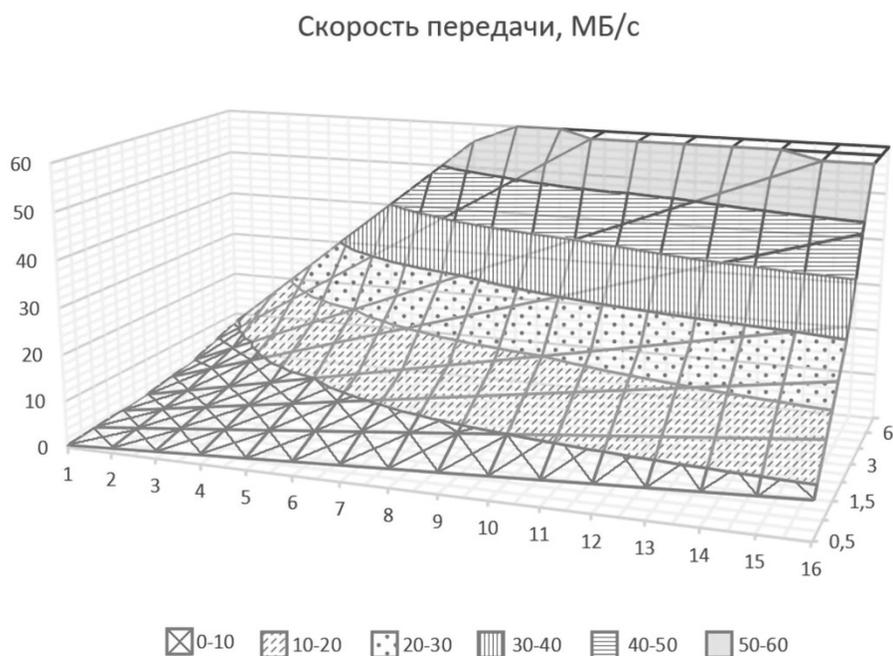


Рис. 2. Зависимость суммарной скорости передачи в канале с АБГШ от числа субполос (ось  $x$ ) и ранжированным по скорости передачи в одной субполосе режимам работы (ось  $y$ )

на  $800 \times 25 \times 6 = 120$  тыс. бит, распределить его по субканалам и субполосам, обеспечив разнос соседних бит не менее чем на 800 символов для обеспечения декорреляции ошибок. Это дости-

гается записью каждого следующего бита в следующий субканал.

Кодер должен реализовывать два вида кодирования: со скоростью 0,5 и 0,25. Формаль-

но третий вид — отсутствие кодирования, при котором в кодере не выполняется преобразование потока бит.Packetная передача данных, реализуемая в станции тропосферной связи (ТРС) ограничивает выбор помехоустойчивых кодов блочными кодами [11]. С точки зрения помехоустойчивости предпочтительна реализация кодов с наибольшими длинами. В подобной ситуации наиболее часто используются коды Рида-Соломона [12, 13]. Однако число бит в информационном пакете на выходе перемежителя для различных форматов этого пакета может и, чаще всего, оказывается не кратным длинам кодовых блоков используемого кода. В этом случае, для каждого из используемых режимов передачи должно быть выполнено сокращение длин информационных пакетов до ближайшей длины, кратной длине кодового блока. Не кодируемый «хвост» бит на выходе кодера должен быть заполнен случайной последовательностью с приемлемыми для энергетики модема свойствами. Данная процедура приведет к незначительному сокращению скорости передачи. Кодовые блоки должны размещаться в порядке следования бит в субканале с переходом на следующий субканал, так как размещение перемежителем соседних бит происходит в различные субканалы.

В модуляторе КРР устанавливает кратность модуляции согласно выбранному рабочему режиму. Процедура формирования цифровых сигналов относительно фазовой модуляции достаточно подробно описана [14, 15]. Частота дискретизации 10,2 МГц, отсчеты имеют 16 разрядов. В каждом субканале модуляция происходит независимо. Отсчеты сформированных вещественных сигналов в различных субканалах и субполосах складываются в групповой сигнал. Для сокращения пикфактора группового сигнала он проходит цифровой ограничитель с амплитудой 3,2 от средней амплитуды группового сигнала.

Из приёмника в демодулятор поступают отсчеты синфазной и квадратурной составляющих, частота дискретизации  $10,2 \text{ МГц} = 2 \times 5,1 \text{ МГц}$ , разрядность 16. Для решения задач синхронизации по несущей частоте, началу посылок и циклов передачи используется процедура формирования текущих функций качества (ФК). ФК определяются для каждого следующего отсчёта на длине посылки, отдельно для синфазной

и квадратурной составляющей. Затем вычисляется суммарная ФК субполосы для текущего отсчёта. Для этого складываются ФК по всем 800 посылкам цикла и по 25 субканалам субполосы, ФК синфазной и квадратурной составляющих также складываются. Таким образом, ФК текущего отсчёта для субполосы определяют  $800 \times 25 \times 2 = 40000$  слагаемых. Максимум ФК определяет середину цикла передачи, и это является решением задачи временной синхронизации. По текущим максимумам ФК генерируются синхроимпульсы начала циклов передачи. Максимум определяет текущий частотный сдвиг.

Декодер определяет вероятность ошибки по числу исправленных кодом Рида-Соломона ошибок. Для рассматриваемых кодов  $m=9$ , следовательно,  $n=2^5-1=31$ . В цикле передачи размещается по 645 кодовых блоков на передачу и на приём. Для  $R=0,5$  число исправляемых ошибок у кода (31, 16) равно  $t=\text{int}(n/4)=7$ . Для  $R=0,25$  (31, 8)  $t=\text{int}(3n/8)=11$ , где  $n$  — длина кодового блока, а  $\text{int}^*$  — целая часть числа. Максимальное количество исправляемых ошибок для скорости 0,5 равно  $645 \times 7 = 4515$ , для скорости 0,25 равно  $645 \times 11 = 7095$ . При приближении измеренной вероятности ошибки к данному порогу следует изменять режим работы в сторону снижения скорости передачи.

Депережежитель преобразует параллельные потоки бит в последовательный поток в соответствии с правилом перемежения имеющим место для текущего режима работы. Далее последовательный поток бит передается получателю сообщений.

Наиболее важной и содержательной частью предлагаемой технологии передачи является использование функций качества приёма, реализованных в демодуляторе и декодере. На основании знания этих функций, вычисляемых в каждом цикле передачи для каждой рабочей субполосы КРР реализует собственную оценку SNR и вероятности ошибочного приёма.

Обобщённый алгоритм функционирования КРР в многолучевом канале. Используются следующие обозначения:

$k$  — номер субполосы;

$L_k$  — номер рабочего режима в  $k$ -той субполосе;

$E_k$  — количество исправленных ошибок в субполосе.

Вербальное описание алгоритма. Алгоритм разбивается на следующие части:

1. Блок операций, направленных на реализацию браковки «плохих» субполос, и перестройку «хороших» субполос.

Получение исходных данных от демодулятора и декодера по текущему циклу передачи в части значений:

– вычисление значения вероятности ошибки

$$P_{\text{ош}}^j = f(E_j) = P_{\text{ош}}^j = \frac{E_j}{2m_j R_j \cdot 10^4} \text{ в } j\text{-том субканале,}$$

где  $m_j, R_j$  — кратность модуляции и скорость кодирования в  $j$ -том субканале;

– сравнение полученного значения вероятности ошибки в  $k$ -той субполосе с допустимым значением  $P_{\text{ош}}^k \leq 10^{-4}$ ;

– браковка «плохих» и перестройка хороших субполос;

– вычисление пригодных субполос;

– вычисление значение SNR в  $j$ -том субканале  $SNR_j = -20 \log_{10} \delta_j$ , где

$$\delta_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^{20000} (1 - Iq(j))^2 + (1 - Qq(j))^2}{20000} \text{ —}$$

нормированная к амплитуде дисперсия шума.

2. Блок операций, направленных на определение условий для выбора рабочего режима в следующем цикле передачи:

– определение среднего значения SNR в пригодных субполосах;

– определение среднего значения вероятности ошибки в пригодных субполосах;

– определение рабочего режима для следующего цикла передачи;

– определение номеров рабочих субканалов в следующем цикле передачи с учётом результатов браковки/перестройки субполос;

– передача параметров рабочего режима в следующем цикле передачи корреспонденту для его перемежителя, кодера и модулятора;

– при невозможности работы в многолучевом радиоканале вследствие неприемлемости его характеристик, KPP переводит станцию радиосвязи в режим работы в условиях преднамеренных и системных помех.

Описание алгоритма:

– расширение базы сигнала до 32, с целью обеспечения декремента мощности помехи на 30 дБ;

– вычисление среднего значения вероятности ошибки в 16 субполосах;

– сравнение полученного значения вероятности ошибки с заданным  $P_{\text{ош}}^*(t) \leq 10^{-4}$ ;

– в случае превышения заданного порога вероятности ошибки, производится разрыв соединения. Если же полученное среднее значение вероятности ошибки меньше или равно заданному пороговому значению, то далее это значение сравнивается с  $P_{\text{ош}}^*(t) \leq 10^{-5}$ ;

– по результатам сравнения в случае при положительном результате база сигнала делится на 2 и далее производится переход к выбору рабочего режима в следующем цикле, в случае же если  $P_{\text{ош}}^*(t) \geq 10^{-5}$  без изменения значения базы сигнала — осуществляется выбор рабочего режима в следующем цикле передачи.

Для практической реализации в KPP порога смены режима работы в сторону уменьшения скорости достаточно определить наличие серии кодовых блоков в одном цикле передачи, в которых исправляется более 5 ошибок для скорости 0,5 и более 9 ошибок для скорости 0,25.

### Выбор аппаратной платформы

Для реализации обобщённого алгоритма KPP необходим выбор аппаратно-программной платформы.

Основные требования к аппаратной платформе, которые необходимо определить:

– объём памяти постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) для прошивки объектного кода программного обеспечения;

– объём памяти оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) используемого вычислителя;

– быстродействие процессора используемого вычислителя;

– интерфейсы взаимодействия KPP с сопрягаемыми модулями радиостанции ТРС.

Для формирования требований к памяти ОЗУ необходимо осуществить расчёт сложности обобщённого алгоритма функционирования KPP во многолучевом канале и при воздействии преднамеренных и системных помех соответственно. Для указанной цели необходимо рассчитать временную и пространственную сложности алгоритмов.

Произведём расчёт временной сложности обобщённого алгоритма. Для этого необходимо произвести следующие действия [16, 17].

1. Определить наличие процедур, имеющих итерационный характер.
2. Определить вложенность процедур.
3. Определить зависимые переменные для каждой процедуры.
4. Посчитать асимптотическую сложность алгоритма.

Процедуры, имеющие итерационный характер:

– процедуры вычисления значения вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}^j = f(E_j) = P_{\text{ош}}^j = \frac{E_j}{2m_j R_j \cdot 10^4}$ ;

– процедуры определения текущего значения вероятности ошибки и сравнения его с заданным  $P_{\text{ош}}^*(t) \leq 10^{-4}$  (сложность линейная  $O(N)$ ).

В процедурах, отвечающих за браковку субполос основная процедура:

$$SNR_j = -20 \log_{10} \delta_j,$$

$$\text{где } \delta_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^{20000} (1 - Iq(j))^2 + (1 - Qq(j))^2}{20000}.$$

Вычисляется  $N$  раз, внутри нее  $M$  раз вычисляется  $\delta_j^2$  — сложность полиномиальная  $O(NM)$ .

Оставшиеся процедуры имеют полиномиальную сложность  $O(NM)$  или линейную  $O(N)$ .

Рассматриваемые процедуры следуют одна за другой, поэтому их сложность складывается.

Асимптотическая сложность всего алгоритма:

$$O(N+NM+NM+N) = O(2N+2NM) = O(2N(M+1)).$$

Если  $M$  и  $N$  больше 10 либо  $N$  значительно больше  $M$ , то асимптотическая сложность всего алгоритма функционирования КРР в многолучевом радиоканале стремится к  $O(2NM)$ .

В рассматриваемом алгоритме  $N$  — максимальное значение, используемое в циклах расчета  $P_{\text{ош}}^j$ , а  $M$  — максимальное значение, используемое в циклах расчета  $\delta_j^2$  блок процедур, находящихся внутри цикла по  $j$ .

Таким же образом произведём вычисления для алгоритма функционирования КРР в условиях преднамеренных и системных помех [18].

Учитывая, что основная процедура, имеющая итерационный характер, это процедура

$$P_{\text{ош}}^*(t) = \frac{1}{N_{sb}} \sum_{j=1}^{16} P_{\text{ош}}^j(t).$$

Здесь количество итераций зависит от  $N_{sb}$ . Следовательно, алгоритм функционирования КРР в условиях преднамеренных и системных помех линейный, имеет асимптотическую сложность  $O(N)$ .

### Требования к объёмам ОЗУ, ПЗУ и другим количественно-качественным характеристикам аппаратной платформы, необходимых для реализации контроллера режима работы

Максимальный объём входных данных определяется уровнем вложенности операций над массивами входных данных. Произведём расчёт необходимого объёма оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), необходимых для реализации обобщенного алгоритма функционирования КРР. Учитывая, что для написания программного обеспечения, входящего в состав программно-аппаратных комплексов разрабатываемых и перспективных автоматизированных систем управления (АСУ) Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ), используются языки программирования высокого уровня C или C++, будем отталкиваться от количественных характеристик, присущих базовым типам данных, определённых в данных языках программирования. Предположим, что для компилирования кода используется компилятор *gcc/g++*, а тип данных соответствует *long int* (или *long long int* — длинное целое, занимающее в памяти 8 байт). Исходя из этого, для определения требований к объёму ОЗУ и произведения расчётов необходимо учесть следующие переменные значения данных:

1. Пакет на 120 тыс. бит, который получает перемежитель в каждом цикле передачи от источника сообщений;

2. ФК одного отсчёта для субполосы 40000 слагаемых;

3. Максимальное количество исправляемых ошибок для скорости 0,5 — 4515 и для скорости 0,25 — 7095. При расчёте будем использовать максимальное из 2-х значений, т.е. 7095;

4. Вычисление значения SNR в  $j$ -том субканале.

Объём ОЗУ необходимый для пакета в 120000 бит:  $120000/8 = 15000$  байт (15 Кбайт), для ФК в одном цикле передачи:

$40000 \times 8 = 320000$  байт (320 Кбайт), для максимального количества исправляемых ошибок при скорости кода  $0,25:7095 \times 8 = 56760$  байт (57 Кбайт), для вычисления значения SNR в  $j$ -том субканале  $20000 \times 8 = 160000$  байт (160 Кбайт). Общее количество:  $15 + 320 + 57 + 160 = 552$  Кбайт. Необходимый объём ОЗУ данных для реализации обобщённого алгоритма функционирования КРР должен быть не менее 552 Кбайт.

Необходимый объём ПЗУ определим путём сравнения подобных программ, написанных на языке C++.

Для определения необходимого объёма ПЗУ использована типовая «программа – заглушка», реализующая представленный алгоритм на случайных последовательностях входных данных. Для сборки исполняемого файла программы был использован компилятор g++ без оптимизирующих опций. Объём исполняемого файла составил 56 Кбайт. Данный объём — это объём программы без оптимизации по объёму памяти, следовательно, максимально возможный объём, его и будем учитывать при определении требований к аппаратной платформе.

Также для выбора аппаратной платформы необходимо определить быстродействие, которое должна обеспечивать аппаратная платформа. Учитывая, что асимптотическая сложность обобщённого алгоритма  $O(2NM)$ , а самый трудоёмкий процесс — это процесс определения SNR в  $j$ -ой полосе, получим  $2 \times (16 \times 20000) = 640000$  операций. Данные операции должны производиться в соответствии с определённой циклограммой процесса передачи посылки за 2 мс, следовательно, аппаратная платформа должна обеспечивать быстродействие не менее  $\Pi = 640000 \text{ оп}/2\text{мс} = 320000000 \text{ оп}/\text{с}$ . При наличии каналов одновременной обработки информации

показатель быстродействия определяется как  $320000000/n$ , где  $n$  — количество каналов одновременной обработки информации.

Применительно к требованиям в части наличия интерфейсов следует учитывать, что для возможности интеграции в прототип аппаратная платформа должна иметь интерфейс Ethernet 10/100.

Страну производитель аппаратной платформы будем определять исходя из требований Постановления Правительства от 17 июля 2015 года № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации», которое регулирует вопросы замещения импортной электронной компонентной базы (ЭКБ) на ЭКБ отечественного производства [19].

Учитывая, что использование ЭКБ иностранного производства в образцах вооружения и военной техники влечёт за собой обязательное выполнение дорогостоящих и длительных специальных проверок для определения отсутствия в закупаемых импортных образцах «закладок», «логических бомб» и т.д., и исходя из требований Постановления Правительства от 17 июля 2015 года № 719 приоритетом при выборе аппаратной платформы будет пользоваться ЭКБ отечественного производства.

Стоимость аппаратной платформы, необходимой для реализации обобщённого алгоритма функционирования КРР не должна превышать 10000 руб., исходя из анализа цен, задекларированных на официальных сайтах производителей.

Быстродействие, которое должна быть аппаратная платформа должна обеспечивать не менее 320000000 операций в секунду.

Обобщённые требования к аппаратной платформе, которые должны быть учтены при её выборе представлены в табл. 1

Таблица 1

Требования к аппаратной платформе КРР

№ п/п	Характеристика	Количественное/качественное значение
1	ОЗУ	не менее 552 Кбайт
2	ПЗУ	не менее 56 Кбайт
3	Интерфейсы	Ethernet 10/100
4	Страна производитель	РФ
5	Цена	10 тыс. руб.
6	Быстродействие	320 DMIPS

Исходя из количественных характеристик, указанных в табл. 1, можно предположить, что для аппаратной реализации КРР потребуется микроконтроллер.

В качестве общего вида ограничений, налагаемых на процесс выбора микроконтроллера для реализации КРР будем использовать данные, представленные в табл. 1.

В качестве «ведущей компоненты» предлагается использовать быстродействие (производительность).

### Выбор аппаратной платформы для реализации контроллера режима работы методом ветвей и границ

Для обоснования рациональности выбора микроконтроллера сравним несколько микроконтроллеров разных производителей, близких по техническим характеристикам. Кратко техни-

ческие характеристики сравниваемых микроконтроллеров приведены в табл. 2 [20–23].

По данным таблицы можно сделать вывод, что необходимыми техническими характеристиками с учётом всех вышеперечисленных ограничений обладает микроконтроллер 1921BK028.

Плюсом данного микроконтроллера является высокая производительность и возможность перезаписи программы, реализующей алгоритм смены режимов работы КРР. Данный факт позволит избежать замены микроконтроллера при отладке и дальнейшей модернизации программного обеспечения.

1921BK028 представляет собой СБИС 32-разрядного микроконтроллера на базе ядра ARM Cortex-M4F, предназначенного для промышленных и потребительских приложений, включая системы дистанционного мониторинга, контрольно-измерительные приборы, сетевые устройства, системы автоматизации

Таблица 2

Сравнительные характеристики микроконтроллеров для реализации КРР

№ п/п	Индекс	Объём ПЗУ	Объём ОЗУ	Интерфейсы	Страна произв. Организация произв.	Цена-тыс. руб.	Производительность
1	K1921BK01T	1 Мб	192 Кбайт	CAN-2, UART-4, SPI-4, I2C-2, USB 2.0, Ethernet	РФ АО «НИИЭТ»	3,9	125 MIPS/МГц
2	1921BK028	2 Мб	704 Кбайт	ГОСТ Р 52070-2003, SpaceWire, Ethernet 10/100, CAN, UART, SPI, I2C	РФ АО «НИИЭТ»	4,1	250 DMIPS Возможность одновременной обработки инф по 48 каналам
3	LM4F132	1 Мбайт	192 Кбайт	CAN-2, UART-4, SPI-4, I2C-2, Ethernet 10/100, USB 2.0	США Texas Instruments	2,1	125 MIPS/МГц
4	K1986BK025	256+8 Кбайт	112 Кбайт	UART-4, SPI-4, I2C-2, USB 2.0, Ethernet	РФ АО «ПКК Миландр»	4,5	1.25 DMIPS/МГц
5	STM32F746NGH6	1 Мб	320 Кбайт	CAN, EBI/EMI, Ethernet, I <sup>2</sup> C, IrDA, LIN, SAI, SD, SPDIF-Rx, SPI, UART/USART, USB OTG	США ST Microelectronics	2	462 DMIPS

производственных процессов, автомобильную электронику, системы управления электродвигателями.

В состав микроконтроллера входит широкий набор цифровой и аналоговой периферии, в связи с чем он может применяться в различных системах цифровой обработки сигналов, в том числе, требующих точных аналогово-цифровых преобразований, в системах управления и сбора информации.

Микроконтроллер имеет встроенную Flash-память программ объемом 2 Мбайт, которую можно использовать для хранения и загрузки пользовательского программного обеспечения.

Также существует дополнительная область размером 512 Кбайт, которая может быть использована для хранения начального загрузчика.

1921BK028 построен на базе процессорного ядра с производительностью 250 DMIPS и поддержкой операций с плавающей запятой. Тактовая частота составляет 200 МГц. Блок АЦП позволяет осуществлять одновременную обработку информации по 48 каналам [24].

Система тактирования микроконтроллера, используя различные источники тактового сигнала, позволяет расширить набор применений и решаемых задач пользователя. Микроконтроллер может тактироваться от внутреннего RC-генератора с частотой 16 МГц, внутреннего осциллятора с внешним кварцевым резонатором, а также сигналом встроенного генератора PLL. Существует возможность гибкой настройки тактовых сигналов для блоков периферии.

При работе с микроконтроллером целесообразно использовать макетно-отладочное оборудование или средства настройки и регулировки. Для реализации указанных функций ООО «НПФ ВЕКТОР» разработало отладочную плату MotorControlBoard3-1921BK028. Плата макетно-отладочная MotorControlBoard3-1921BK028 предназначена для освоения и изучения 32-разрядных микроконтроллеров 1921BK028, а также для макетирования и отладки систем пользователя на ее основе. С использованием платы возможно подключение внешних элементов к портам микроконтроллера, программирование встроенной памяти, отладка и оценка работы прикладных программ.

## Заключение

Сформулированный обобщенный алгоритм функционирования позволит КРР формировать режимы работы и осуществлять их выбор при различных состояниях канала связи. Так в АБГШ при улучшении отношения сигнал/шум эффективно увеличение кратности модуляции и повышение скорости помехоустойчивого кодирования и, только потом, увеличение числа рабочих субполос. В каналах с замираниями, в первую очередь, предпочтителен рост числа субполос. Произведен расчет вычислительной сложности обобщенного алгоритма функционирования КРР в радиоканале ТРС, который показал, что для реализации КРР необходимо использовать микроконтроллер с высокой производительностью и большим объемом ОЗУ. На основе обоснованных характеристик аппаратной платформы, предложен вариант реализации КРР на базе микроконтроллера 1921BK028.

## Литература

1. Общая теория радиолокации и радионавигации. Распространение радиоволн: учебник / А.Н. Фомин, В.А. Копылов, А.А. Филонов, А.В. Андронов; под общ. ред. А.Н. Фомина. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2017. 318 с.
2. Рагузин С.В. Моделирование и разработка помехозащищенных цифровых тропосферных радиолоний с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: диссертация кандидата технических наук: 05.13.16., 05.12.13. — Ульяновск: Ульяновский филиал Военного университета связи. 1999. 199 с.
3. Garg A., Das S.S. Design of troposcatter broadband link based on SCFDE. In: 2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). P. 1–6 (2017).
4. Колосов С.В. Методики расчета радиорелейных и тропосферных линий: учебное пособие / С.В. Колосов, С.М. Тверитин. — М.: М-во образования и науки Российской Федерации. 2018. 168 с.
5. Batueva E.V., Darizhapov D.D. Characteristics of rapid signal fluctuations along Far Eastern tropospheric paths. J. Commun. Technol. Electron. 53. 2008. P. 558–560.

6. Кеннеди Р. Каналы связи с замиранием и рассеиванием. — М.: Сов. радио. 1973. 304 с.
7. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. — М.: Радио и связь. 1982. 304 с.
8. Давыденко Ю.И. Дальняя тропосферная связь. — М. 1968. 212 с.
9. Кириллов Н.Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами / Н.Е. Кириллов. — М.: Связь. 1971. 256 с.
10. Плотников Н.Н. Методика анализа скорости передачи в многополосной радиолнии, образованной малогабаритными станциями тропосферной радиосвязи / Н.Н. Плотников, А.В. Войнов // Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук. 2021. № 117. С. 54–61.
11. Вернер М. Основы кодирования. Учебник для ВУЗов. — М.: Техносфера. 2004. 288 с.
12. Банкет В.Л. Помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах: учеб. пособ. / В.Л. Банкет, П.В. Ивашенко, Н.А. Ищенко. — Одесса: ОНАС им. А.С. Попова. 2011. 104 с.
13. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. — СПб: Наука. 2007. 267 с.
14. Maokai H., Xihong C., Tao S., Shaoqiang D. New generation troposcatter communication based on OFDM modulation. In: Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI 2009). 2009. P. 164–167.
15. Tufvesson F., Faulkner M., Maseng T. Pre-Compensation for Rayleigh Fading Channels in Time Division Duplex OFDM Systems. *Wireless Personal Communications* 16. 2001. P. 21–33.
16. Ахо Альфред В., Хопкрофт Джон Э., Ульман Джеффри Д. Структуры данных и алгоритмы. Пер. с англ.: — М.: Издательский дом «Вильямс». 2016. 400 с.
17. Структуры и алгоритмы обработки данных: учебное пособие / В.Я. Пророк, С.А. Лепешкин, Д.О. Петрич, А.А. Шульгин. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. 204 с.
18. Плотников Н.Н. Выбор алгоритма адаптации по рабочей частоте в однополосной радиолнии тропосферной связи / Н.Н. Плотников, А.В. Войнов, А.Н. Путилин // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5–6 (155–156). С. 3–8.
19. Постановление Правительства Российской Федерации от 17 июля 2015 г. № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации». 379 с.
20. SAK-XC167CI-32F40F BB-A Infineon 16-битные микроконтроллеры. Режим доступа <https://ru.mouser.com/Search/Refine?Keyword=SAK-XC167CI-32F40F+BB-A> (дата обращения 10.02.2021).
21. Stellaris® LM4F Series MCUs. Режим доступа: [https://www.ti.com/lit/ml/spmt273a/spmt273a.pdf?ts=1619971925974&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ml/spmt273a/spmt273a.pdf?ts=1619971925974&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (дата обращения 10.02.2021).
22. Сайт АО «ПКК Миландр». Микроконтроллеры и процессоры. Режим доступа: [https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery\\_i\\_protsestory/32\\_raznyadnye\\_mikrokontrollery/](https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protsestory/32_raznyadnye_mikrokontrollery/) (дата обращения 10.02.2021).
23. Сайт АО «НИИЭТ» Микроконтроллеры и процессоры. Режим доступа: <https://niiet.ru/product/%D0%BA1921%D0%B2%D0%BA01%D1%821/> (дата обращения 10.02.2021).
24. Спецификация. Микросхема системы управления для комплексов связи 1921BK028 493 с.

## References

1. Fomin A.N. General theory of radar and radio navigation. Propagation of radio waves: textbook / under total. ed. A.N. Fomin. — Krasnoyarsk: Sib. Feder. un-t. 2017. 318 p.
2. Raguzin S.V. Modeling and development of noise-immune digital tropospheric radio lines with pseudo-random restructuring of the operating frequency: dissertation of a candidate of technical sciences: 05.13.16., 05.12.13. — Ulyanovsk: Ulyanovsk branch of the Military University of Communications. 1999. 199 p.
3. Garg A., Das S.S. Design of troposcatter broadband link based on SCFDE. In: 2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). 2017. P. 1–6.
4. Kolosov S.V. Methods for calculating radio relay and tropospheric lines: a tutorial / S.V. Kolosov, Tveritin S.M. Ministry of Education and Science of the Russian Federation. — Moscow. 2018. 168 p.

5. Batueva E.V., Darizhapov D.D. Characteristics of rapid signal fluctuations along Far Eastern tropospheric paths. *J. Commun. Technol. Electron.* 53. 2008. P. 558–560.
6. Kennedi R. Communication channels with fading and dispersal. — M.: Sov. radio. 1973. 304 p.
7. Kloviskiy D.D. Transfer of discrete messages over radio channels. — M.: Radio and communication. 1982. 304 p.
8. Davydenko Y.I. Distant tropospheric communication. — M. 1968. 212 p.
9. Kirillov N.E. Noise-immune transmission of messages over linear channels with randomly changing parameter. — M.: Svyaz. 1971. 256 p.
10. Plotnikov N.N. Methodology for analyzing the transmission rate in a multiband radio link formed by small-sized tropospheric radio stations / N.N. Plotnikov, A.V. Voinov // *Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences.* 2021. № 117. P. 54–61.
11. Werner M. Foundations of coding. Textbook for universities. — Moscow: Technosphere. 2004. 288 p.
12. Banquet V.L. Noise-resistant coding in telecommunication systems: textbook. manual / V.L. Banquet, P.V. Ivaschenko, N.A. Ishchenko. — Odessa: ONAT them. A.S. Popova. 2011. 104 p.
13. Deev V.V. Methods of modulation and coding in modern communication systems. — Saint Petersburg: Nauka. 2007. 267 p.
14. Maokai H., Xihong C., Tao S., Shaoqiang D. New generation troposcatter communication based on OFDM modulation. In: *Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI 2009).* 2009. P. 164–167.
15. Tufvesson F., Faulkner M., Maseng T. Pre-Compensation for Rayleigh Fading Channels in Time Division Duplex OFDM Systems. *Wireless Personal Communications* 16. 2001. P. 21–33.
16. Aho Alfred W. Data structures and algorithms / Aho Alfred W., Hopcroft John E., Ullman Jeffrey D. Per. from English: — M.: Publishing house «Williams». 2016. 400 p.
17. Prorok V.Y. Structures and algorithms for data processing: textbook / V.Y. Prorok, S.A. Lepeshkin, D.O. Petrich, A.A. Shul'gin. — SPb: Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2016. 204 p.
18. Plotnikov N.N. The choice of the adaptation algorithm for the operating frequency in a single-sideband radio link of tropospheric communication / N.N. Plotnikov, A.V. Voinov, A.N. Putilin // *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu.* 2021. № 5–6 (155–156). P. 3–8.
19. Resolution of the Government of the Russian Federation № 719 dated July 17, 2015 «On Confirmation of Industrial Production in the Territory of the Russian Federation». 379 p.
20. SAK-XC167CI-32F40F BB-A Infineon 16-bit microcontrollers. Access mode: <https://ru.mouser.com/Search/Refine?Keyword=SAK-XC167CI-32F40F+BB-A> (date of access 10.02.2021).
21. Stellaris® LM4F Series MCU. Access mode: [https://www.ti.com/lit/ml/spmt273a/spmt273a.pdf?ts=1619971925974&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ml/spmt273a/spmt273a.pdf?ts=1619971925974&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (date of access 10.02.2021).
22. The site of JSC «PKK Milandr». Microcontrollers and processors. Access mode: [https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery\\_i\\_protssory/32\\_razryadnye\\_mikrokontrollery/](https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssory/32_razryadnye_mikrokontrollery/) (date of access 10.02.2021).
23. Site of JSC «NIIET» Microcontrollers and processors. Access mode: <https://niiet.ru/product/%D0%BA1921%D0%B2%D0%BA01%D1%821/> (date of access 10.02.2021).
24. Specification. Control system microcircuit for communication complexes 1921BK028 493 p.