Раздел VI. Защита телекоммуникаций

УДК 681.391

В.Т. Корниенко, Ле Тхи Фыонг Май

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ СХЕМЫ СВЕРТОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРА LABVIEW

Целью статьи является анализ повышения эффективности систем HARQ на основе использования сверточного кодирования с прокалыванием бит в качестве помехоустойчивого кода и выборочного повторения (SR) как самого эффективного протокола повторной передачи ARQ. Построен виртуальный прибор системы в среде LabVIEW для анализа пропускной способности и вероятности появления ошибочных пакетов. При использовании помехоустойчивого кода улучшается пропускная способность и уменьшается вероятность появления ошибки пакетов благодаря возможности коррекции ошибок.

Сверточное кодировние; прокалывание бит; повторная передача; выборочное повторение; вероятность появления ошибочных пакетов; пропускная способность; виртуальный прибор LabVIEW.

V.T. Kornienko, Le Thi Fiong May

HYBRID CIRCUIT OF CONVOLUTIONAL CODING EFFICIENCY ANALYSIS BY MEANS OF THE LABVIEW VIRTUAL DEVICE

The purpose of this article is the analysis of increase of efficiency of HARQ systems by means of punctured convolutional coding as a noise proof code and selective recurrence (SR) as most effective protocol of ARQ. The virtual device of system in LabVIEW environment for the throughput analysis and probability of erroneous packages occurrence was developed. When using noise code improves throughput and packet error probability decreases due to the possibility of error correction.

Convolutional coding; bit puncturing; repeated transfer; selective recurrence; probability of erroneous packages occurrence; throughput; LabVIEW virtual device.

Одной из важнейших задач, которые необходимо решать в области беспроводных систем связи является обеспечение высокой достоверности передачи данных и повышение качества обслуживания пользователей (уменьшение вероятности ошибки передачи информации). Эта проблема особенно актуальна в беспроводных системах связи, системах охраны территориально распределенных объектов, работающих в сложных условиях распространения сигналов.

К наиболее эффективным методам [1, 2] обеспечения высокой скорости передачи информации и малой вероятности битовой ошибки (bit error rate – BER) в условиях высокого уровня шума канала – это использование схемы помехоустойчивого кодирования с обратной связью (ARQ/FEC). Схемы ARQ (автоматический запрос повтора) и FEC (прямая коррекция ошибок) являются двумя основными методами контроля ошибок. Протокол повторной передачи ARQ – это ключевой элемент на канальном уровне с простой реализации и высокой надежностью. Однако если коэффициент ошибок канала высоко, и пропускная способность также быстро уменьшается из-за увеличенной частоты повторной передачи. Если используется помехоустойчивое кодирование для обеспечения высокой надежности,

то приходится применить длинный мощный код и большую память. Это приводит к трудностям в выполнении декодирования. Чтобы преодолеть недостатки в обеих схемах, используется система связи с гибридным автоматическим запросом повторной передачи (HARQ), комбинирующая схемы FEC со схемами ARQ.

Целью статьи является повышение эффективности систем HARQ на основе использования сверточного кодирования в качестве помехоустойчивого кода и выборочного повторения (SR) как самого эффективного протокола повторной передачи ARQ.

Протоколы с выборочным повторением (SR). Выборочно-повторный протокол ARQ является самым эффективным среди трех основных протоколов повторной передачи ARQ, однако этот протокол также сложнее в реализации.

Для простоты и эффективности в этой статье предлагается, что после первой передачи получатель собрал все порядковые номера с сообщениями NAK и отправил обратно к передатчику. Передатчик ретранслирует все пакеты с порядковым номером NAK, которые прежде были сохранены в буфере для отправки получателю (рис. 1). Процесс повторяется до трех раз. После этой процедуры, пакеты, о которых все еще объявляется, что они ошибочные, будут объявлены как отброшенные пакеты. Для снижения трудоемкости и времени реализации – рассматриваем стандартную пакетную длину с 8 битами, и 1 000 пакетов для передачи.

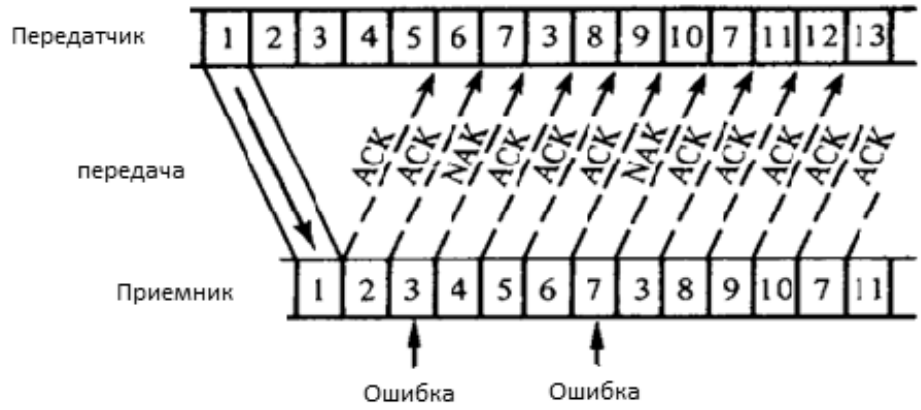


Рис. 1. Протоколы с выборочным повторением

Структура модели Гибридной ARQ-схемы. В этом модели информационные пакеты являются уже закодированным CRC сверточным кодом с разными скоростями $1/R_c$. Поэтому k закодированных пакетов CRC становятся закодированным сообщением с $R_c k$ битами.

Эти $R_c k$ биты будут использованы для двоичной фазовой манипуляции (BPSK) и переданы в канал AWGN. На приемной стороне поток битов также проходит обработку, только в обратной порядке. Если CRC обнаруживает сбои, то требуется повторная передача (рис. 2).

Алгоритм повторной передачи. Декодируемый пакет является такого же размера как исходный фрейм, который состоял из пакета данных с CRC-16. После чего на стороне получателя вычисляется синдром.

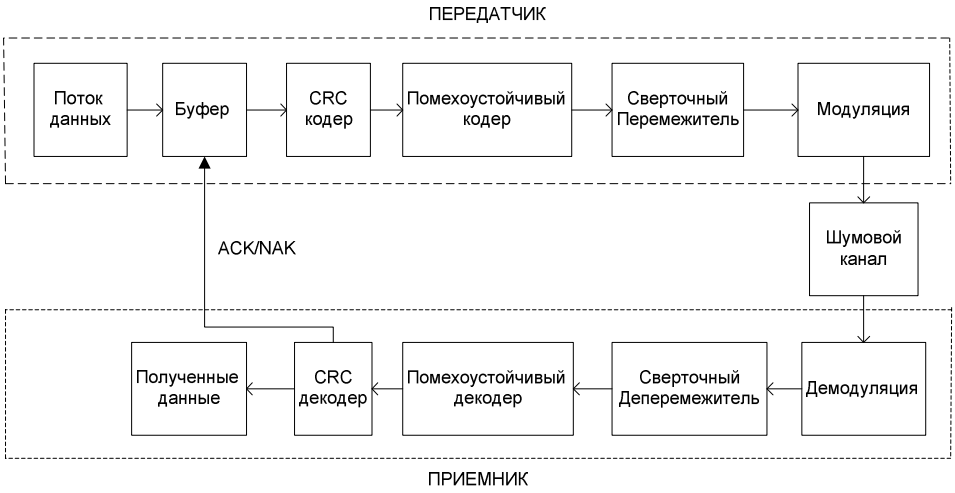


Рис. 2. Структура гибридной ARQ-схемы

Когда синдром является нулем, фрейм принимается, и CRC часть удаляется, информационные данные пересылаются на сетевой уровень и отправляется положительное подтверждение ACK обратно к передатчику. Если это пакет данных не нулевой, то произошла ошибка, указывающая порядковый номер бита, в котором ожидается ошибка, и отрицательное подтверждение отправляется обратно к передатчику. Когда все пакеты в первой передаче приняты, получатель собирает все порядковые номера с подтверждением NAK и отсылает обратно к передатчику. Передатчик ретранслирует все пакеты с соответствующим порядковым номером NAK, который был сохранен прежде в буфере (рис. 3). Процесс повторяется до трех раз, чтобы уменьшить задержку. После 3-х итераций пакеты, о которых все еще объявлено, что они ошибочные, будут отброшенными пакетами.

Исследование эффективности алгоритма в системе HARQ на основе разработанной модели. Целью моделирования по разработанному алгоритму является определение количества ошибочных пакетов при передаче сигнала через канал связи и определение пропускной способности модели. Различные параметры помехоустойчивого кода и типа модуляции [3, 4] также могут оказывать существенное влияние на прохождение сигнала через шумовой канал Гаусса. Для этого необходимо при различных параметрах модели канала оценить их влияние на вероятность ошибок при передаче данных.

Влияние кодовой скорости помехоустойчивого кода FEC на вероятность появления ошибочных пакетов PER и пропускную способность в системе связи HARQ. Для фиксированного кодового ограничения $K=3$ рассмотрим как влияют на вероятность появления ошибки PER и пропускную способность в системе связи с запросом повторной передачи различные кодовые скорости R=1/2, 1/3, 1/4. Результаты приведены на рис. 4, 5, 6 соответственно.

Скорость кода в стандартном сверточном кодере в среде LabVIEW можно изменить процессом перфорации. Этот процесс состоит в систематическом удалении из процесса передачи в канал некоторых битов с выхода низкоскоростного кодера. Так как структура решетки низкоскоростного кодера не изменяется, то количество информационных символов не изменяется. В результате, выходная последовательность принадлежит *перфорированному сверточному* (PC) *коду* более высокой скорости. В процессе декодирования перфорированного кода используется декодер Витерби низкоскоростного кода с восстановлением «удаленных» сим-

волов на своих позициях (процесс *деперфорации).* Восстановленные «удаленные» символы метятся специальным флагом. Это может быть сделано, например, с помощью дополнительного бита, устанавливая его в 1 на позициях стираний.

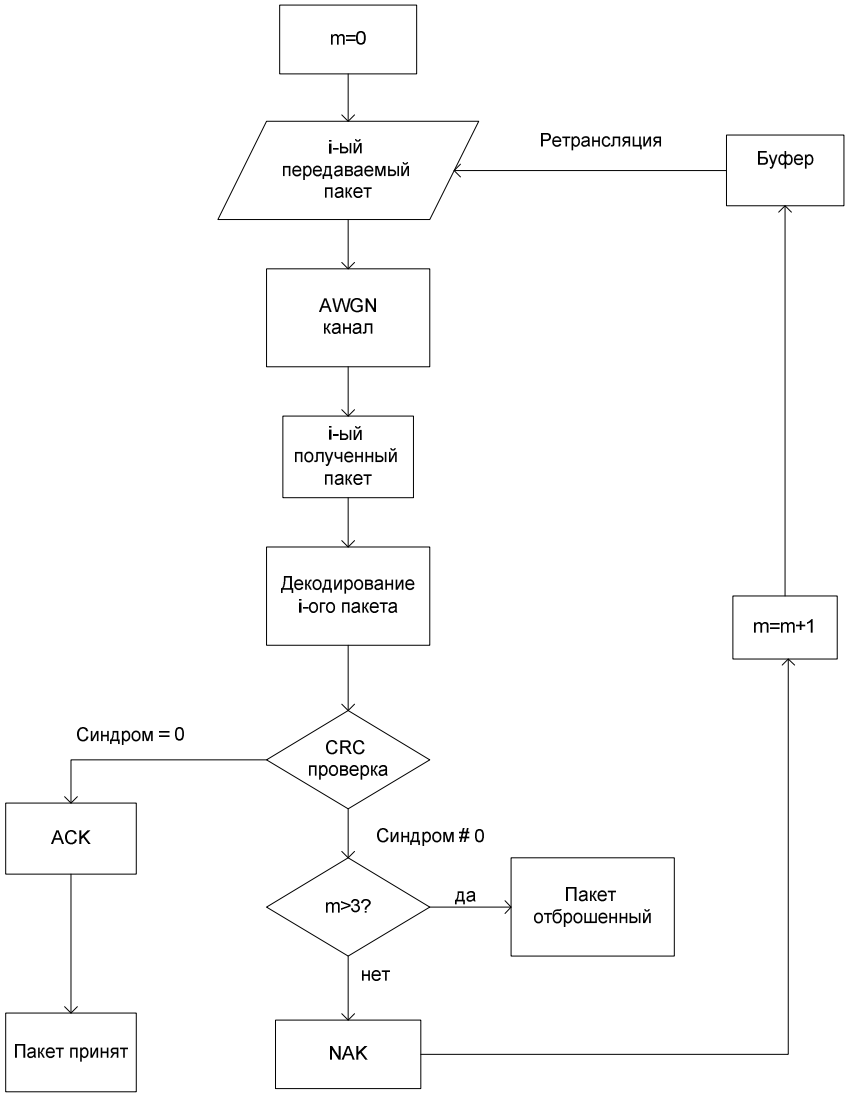
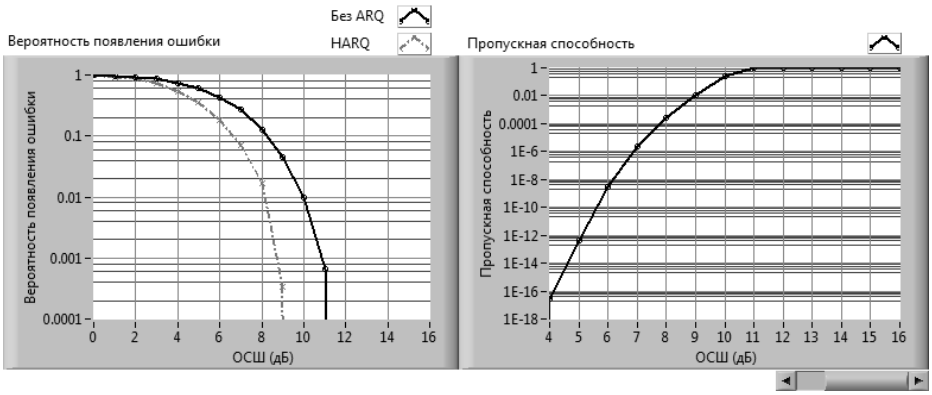


Рис. 3. Блок-схема алгоритма повторной передачи

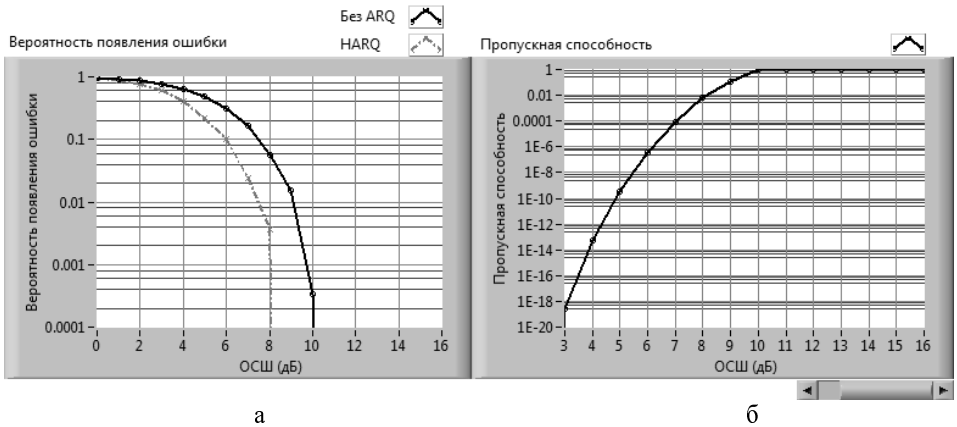
Поэтому изменение скорости кода прямо влияет на скорость передачи данных. Чем больше скорости кода, тем меньше количество передаваемых битов, и тем меньше время передачи данных. Однако с уменьшением скорости кода, вероятность появления ошибочных пакетов также убывает при равных отношениях сигнал/шум (ОСШ). Это утверждение можно хорошо наблюдать на рис. 4,а, 5,а, 6,а. В HARQ системе, минимальная вероятность ошибки для скоростей *R=1/2, 1/3, 1/4* соответственно достигается при ОСШ, равном 9 дБ, 8 дБ и 7 дБ. В системе, не используя алгоритм повторной передачи, эти значения также заметно уменьшаются соответственно, начиная с 11 дБ, 10 дБ и 9 дБ.

На графиках 4,б, 5,б, 6,б показаны пропускные способности для различных скоростей *R* сверточного кода. Аналогично, с уменьшением скорости кода, пропускная способность схемы повышается при равных ОСШ. Например, при ОСШ, равном 8 дБ, значения пропускной способности для *R=1/2, 1/3, 1/4* равны примерно 0,0003, 0,01, 0,06 соответственно.



а б

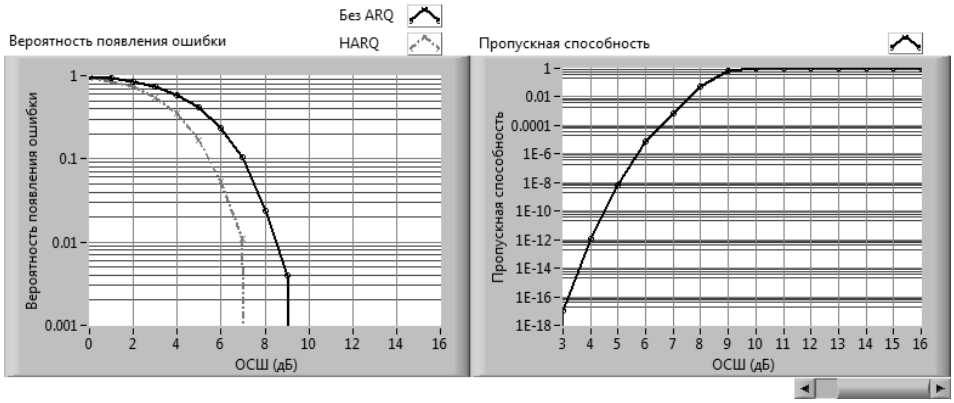
Рис. 4. Вероятность появления ошибочных пакетов PER (а) и пропускной способности (б) для скорости R=1/2 сверточного кода



а б

Рис. 5. Вероятность появления ошибочных пакетов PER (а) и пропускной способности (б) для скорости R=1/3 сверточного кода

Влияние кодового ограничения K помехоустойчивого кода FEC на вероятность появления ошибочных пакетов PER и пропускную способность в системе связи HARQ. Наибольшую сложность имеют декодеры Витерби, объем вычислений (сложность) которых возрастает экспоненциально с ростом длины кодового ограничения (ДКО) *K*. При использовании алгоритма Витерби увеличение *K* на единицу более чем вдвое увеличивает объем вычислений декодера, но дает прирост в эффективности –0,4 … 0,5 дБ [1]. Поэтому практически используемые декодеры выполняются для кодов с $K < 7 ... 8$. В приведенной модели, при декодировании используется декодер Витерби с твердым принятием решения с изменением *K* от 3 до 6. Коды с большим кодовым ограничением *K* являются более мощными. В дальнейшем, проверим влияние значения *K* на работу модели.

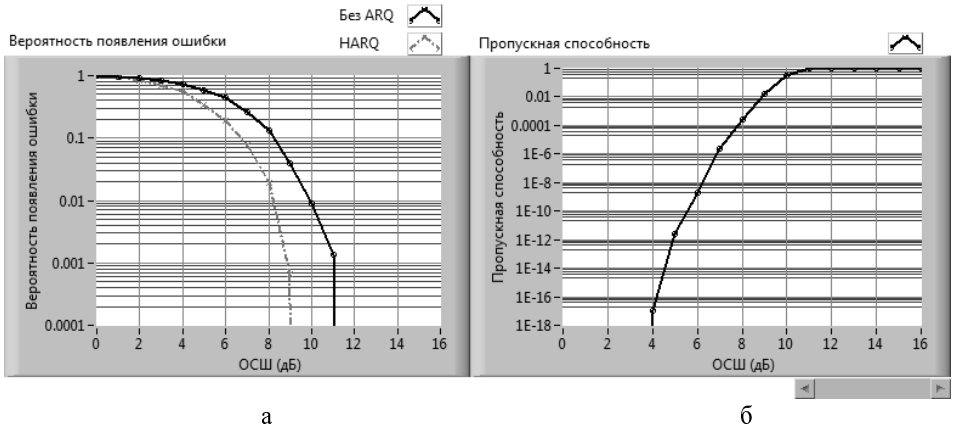


а б

Рис. 6. Вероятность появления ошибки PER (а) и пропускной способности (б) для скорости R=1/4 сверточного кода

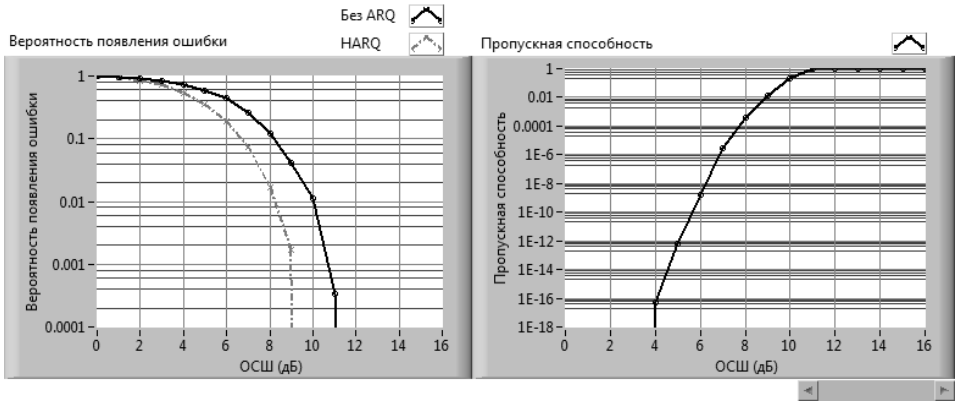
Для фиксированной скорости кода R=1/2 рассмотрим как влияет прокалывание бит на вероятность появления ошибки PER и пропускную способность в системе связи с запросом повторной передачи и без этого прокалывания бит для различных *K=3, 4, 5, 6*. Как отмечало выше, при использовании алгоритма Витерби увеличение ДКО *K* на единицу более чем вдвое увеличивает объем декодера, но дает прирост в эффективности –0,4 … 0,5 дБ [2].

По результатам моделирования заметим, что для *K = 5* получается меньшая вероятность появления ошибки PER при одинаковых значениях ОСШ по сравнению с остальными *K*. Более этого, использование *K* = 5 дает результат в 2 раза быстрее, чем для случая K = 6 при декодировании. На рис. 7,б – 9,б показаны зависимости пропускной способности приемника от ОСШ в диапазоне от 6 до 16 дБ. Видно, что предложенный алгоритм при *K = 5* также дает выигрыш в пропускной способности.



а б

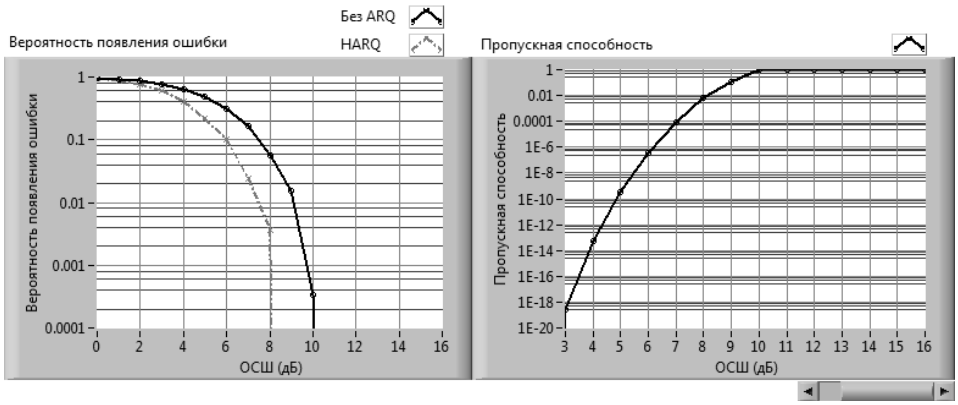
Рис. 7. Вероятность появления ошибки PER (а) и пропускной способности (б) для кодового ограничения K=3 со скоростью кода ½



а б

Рис. 8. Вероятность появления ошибки PER (а) и пропускной способности (б) для кодового ограничения K = 4 со скоростью кода ½

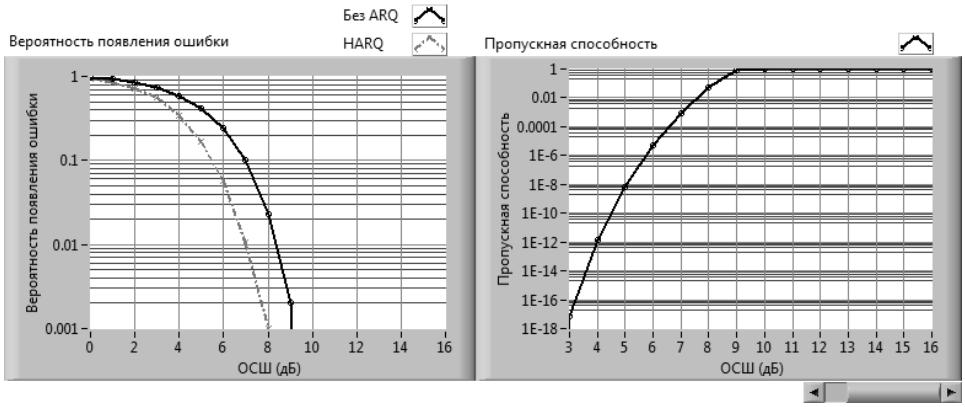
Влияние типа декодирования на вероятность появления ошибки PER и пропускной способности в системе связи HARQ. В принципе, существуют два метода декодирования помехоустойчивых кодов, основанных на принятой последовательности действительных чисел: *декодирование с жестким решением* (hard decision decoding) (HDD) и *декодирование с мягким решением* (soft-decision decoding) *(SDD).*



а б

Рис. 9. Вероятность появления ошибки PER (а) и пропускной способности (б) для кодового ограничения K = 5 со скоростью кода ½

На рис. 10,а показаны результаты вероятности появления ошибки и пропускной способности (рис. 10,б) для декодера с мягким решением SDD в случае манипуляции в канале при передаче данных типа ФМ-2. Сравнение с тем же результатами для декодера с твердым решением HDD показывает улучшение при передаче данных. В режиме HARQ с повторной передачи или ARQ, ОСШ для декодера SDD меньше, чем декодера HDD на 1 … 3 дБ при одном значении вероятности появления ошибки. Эффективность при использовании декодера SDD также можно заметить и при анализе пропускной способности.



а б

Рис. 10. Вероятность появления ошибки PER (а) и пропускной способности (б) для декодера с мягким решением для ФМ-2

В работе получены следующие основные результаты:

1. При использовании помехоустойчивого кода улучшается пропускная способность и уменьшается вероятность появления ошибки пакетов благодаря возможности коррекции ошибок.

2. Использование в разработанной модели различных кодовых скоростей R=1/2, 1/3, 1/4, достигнутое при перфорации битовой последовательности, при скорости кода R = 1/4, дает лучшую эффективность пропускной способности и вероятности появления ошибки, т.е. процесс перфорации не только улучшает эффективность разработанного алгоритма, но и играет большую роль в увеличении скорости передачи данных в канале.

3. Использование декодера Витерби в разработанной модели выполнено для кодов с длиной кодового ограничения $K < 7$ вследствие ограничения на объем декодера. Для $K= 5$ получена наименьшая вероятность появления ошибки PER при одинаковых значениях ОСШ по сравнению с остальными K.

4. Из исследования эффективности декодера с твердым HDD и мягким решениям SDD следует, что SDD более трудоемко, чем HDD из-за требования выполнения операций с действительными числами и необходимости вычисления апостериорных статистик для кодовых символов в декодере SDD. Однако излучаемая мощность передатчика SDD может быть снижена на 50–63 % по сравнению со случаем HDD. Экономия мощности преобразуется в меньший размер передающей антенны или в меньший размер приемной антенны при той же мощности передатчика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rui Lin, Philippa A. Martin* Hybrid ARQ for Non-Orthogonal Space-Time Block Codes // International Symposium on Information Theory and its Applications, ISITA2008, Auckland, New Zealand, 7-10, December, 2008.
2. *Norfishah Ab. Wahab, Ir. Muhammad Ibrahim, SuziSerojaSarnin, Naimah Mat Isa* Performance of Hybrid Automatic Repeat Request Scheme with Turbo Codes // IMECS. – 2010. – P. 884-889.
3. *Ле Тхи Фыонг Май* Представление гибридной схемы автоматического запроса повтора с турбокодами // Материалы 4-й Международной научно-технической и научно-методической конференции «Проблемы современной системотехники». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 42-47.

4. *Ле Тхи Фыонг Май* Повышение эффективности систем HARQ на основе комбинирования сверточного кодирования и выборочного повторения (SR) протокола повторной передачи ARQ // Материалы Всероссийской научной конференции "Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем" ("Системотехника-2011"). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 165-175.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.Ю. Руденко.

Корниенко Владимир Тимофеевич
Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.
E-mail: vlad_korn65@mail.ru.
347924, г. Таганрог, ул. Дзержинского, 170, кв. 53.
Тел.: +79515271225.
К.т.н.; доцент.

Ле Тхи Фыонг Май
E-mail: vlad_korn65@mail.ru.
347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1, ком. 315.
Тел.: +79515271225.
Аспирант.

Kornienko Vladimir Timofeevich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.
E-mail: vlad_korn65@mail.ru.
170, Dzerzinsky Street, Fl. 53, Taganrog, 347924, Russia.
Phone: +79515271225.
Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Le Thi Fiong May
E-mail: vlad_korn65@mail.ru.
1, Engels Street, Fl. 315, Taganrog, 347929, Russia.
Phone: +79515271225.
Postgraduate Student.

УДК: 681.327.8

Д.Ф. Хисамов

ОЦЕНКА ПРИЕМА АПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА КАНАЛАХ НИЗКОГО КАЧЕСТВА

Разработан математический аппарат для оценки вероятности неприема апериодической псевдослучайной последовательности (АПСП) в биномиальных и составных каналах с релеевскими замираниями при синхронизации по методу зачетного отрезка в системах защиты информации. Проведены сравнительные оценки синхронизации датчиков АПСП в указанных каналах для различных периодов псевдослучайной последовательности и качества канала связи. На основе расчетов даны практические рекомендации по реализации систем синхронизации датчиков АПСП на каналах с памятью.

Синхронизация; псевдослучайная последовательность; алгоритм синхронизации апериодической ПСП.