

УДК 621.391

А. Ю. ЛАВРИНЕНКО, Г. Ф. КОНАХОВИЧ, Р. С. ОДАРЧЕНКО, Д. И. БАХТИЯРОВ

*Национальный авиационный университет, Украина***АЛГОРИТМ СЖАТИЯ СИГНАЛОВ РЕЧЕВЫХ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ  
ФУНКЦИЯМИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*Предложено использовать разработанный алгоритм сжатия цифровых сигналов речевых команд управления на основе вейвлет-преобразования в задачах голосового радиоуправления функциями беспилотного летательного аппарата. Исследованный алгоритм позволяет добиться оптимального результата в улучшении степени сжатия передаваемых речевых данных при сохранении достаточного качества сигнала на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления. Обоснована и экспериментально доказана целесообразность использования представленного алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления функциями беспилотного летательного аппарата на основе вейвлет-преобразования. Полученные результаты экспериментального исследования позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего практического применения предложенного алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления на основе вейвлет-преобразования в разрабатываемой системе голосового радиоуправления функциями беспилотного летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** алгоритм сжатия, беспилотный летательный аппарат, голосовое управление, голосовая аутентификация, речевые сигналы, вейвлет-преобразование, арифметическое кодирование.

**Введение**

В настоящее время наблюдается активное развитие оборонного производства Украины, одна из основных и главных задач которого, внедрение кардинально новых высокотехнологических средств в область военной связи, а именно, создание защищенной системы голосового радиоуправления функциями беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для решения поставленных задач в военно-разведывательных целях.

БПЛА в сегодняшнем мире проходят в своем развитии тот же этап, что и пилотируемые самолеты на заре авиации. Становится понятно, что БПЛА будут использовать для решения ряда задач, однако их потенциальные возможности еще далеко не полностью раскрыты. Само удаление пилота из летательного аппарата должно не только давать большую свободу в применении этой техники, но и обеспечивать БПЛА возможности, недоступные для пилотируемых самолетов.

В перспективе БПЛА могут стать более маневренными, чем летательные аппараты, управляемые людьми. Отчасти это позволит решить проблему надежности самих БПЛА. Пока привлекательными их делают в основном относительно небольшие габариты и применение неметаллических конструкционных материалов. Вместе с тем крупные малоскоростные неманеврирующие БПЛА остаются достаточно несложными целями для поражения, как по-

казал опыт грузино-абхазского противодействия.

Еще одним способом повышения надежности БПЛА может стать применение так называемых стелс-технологий, которые позволяют сделать самолет менее заметным. БПЛА, в которых подобные технологии в той или иной степени используются, еще не производятся серийно. Однако данные проекты, находящиеся на различных стадиях реализации, существуют в США, Европе и Китае.

В настоящее время главные функции БПЛА: мониторинг, разведка. Например, поиск пожаров, транспортных средств, противника, оценка последствий катастроф и т.д. Поиск ведется по заранее заданному маршруту или с помощью дистанционного радиоуправления БПЛА оператором.

Одно из быстроразвивающихся направлений – доставка БПЛА грузов. Это могут быть военные грузы, в т.ч. бомбы, ракеты или гражданские, например, почтовые грузы, спасательные средства для терпящих бедствия и пр.

В процессе разработки системы голосового радиоуправления функциями БПЛА возникло большое множество важных научно-исследовательских задач, в частности, одной из главных и ключевой задачей является реализация удобного и надежного управления функциями БПЛА посредством речевых команд легальных субъектов управления. При рассмотрении данной задачи возникает главная проблема, связанная с поиском компромисса между повышением степени сжатия передающих речевых

команд, дабы сократить избыточность речевого потока, тем самым, увеличивая пропускную способность радиоканала связи и обеспечением достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления. Для решения возникшей проблемы разработан и исследован предлагаемый алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе вейвлет-преобразования (ВП).

## 1. Анализ существующих исследований и публикаций

В научном сообществе существуют известные исследования, проведенные за последние годы в области обработки, анализа, синтеза и кодирования речевых сигналов, результаты которых рассмотрены и проанализированы в представленных публикациях [1-6].

Одним из первых подходов, которые попытались решить поставленную задачу данной статьи является разработанный алгоритм кодирования речи на основе быстрого пакетного ВП, которое позволяет эффективно переводить сигнал из временного представления в частотно-временное. Используя главные свойства ВП, существенно позволит уменьшить среднюю скорость передачи данных кодера. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что предложенный алгоритм кодирования речевых сигналов на основе быстрого пакетного ВП, будет функционировать со средней скоростью передачи битов (СПБ) 39,4 Кбит/с [1].

Предложен авторами следующий метод многомерного сжатия речи, основанный на пакетном ВП, где сигналы сжимаются в доменах с различными частотно-временными разрешениями и распределениями энергии в этих областях. Проведенные эксперименты показывают, что этот метод достаточно сложный в реализации и эффективен для сжатия речи, при СПБ 2 Кбит/с [2].

Следующие авторы представили статью, где проведен сравнительный анализ между наиболее известными ортогональными вейвлет-функциями. Осуществлены оценивания коэффициента сжатия (КС) в зависимости от коэффициента корреляции (КК), отношение сигнал / шум (ОСШ), пикового отношения сигнал / шум (ПОСШ) и среднеквадратичной ошибки (СКО). В результате эксперимента было доказано преимущество семейства вейвлет-функций Добеши и Симлет в отличие от всех других исследуемых ортогональных вейвлет-функций. Полученные результаты КК – 0,9639 (0,9639), ОСШ – 11,4959 дБ (11,4894 дБ), ПОСШ – 31,2966 дБ

(31,2901 дБ), СКО – 0,2662 (0,2664) позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего использования вейвлет-функций Добеши и Симлет в качестве материнской вейвлет-функции для ВП [3].

В очередной статье предпринята попытка оценить метод сжатия речевых сигналов на основе ВП. Проведено сравнение различных вейвлет-фильтров, чтобы выбрать наилучший вейвлет-фильтр, пригодный для речевых сигналов с точки зрения обеспечения низкой скорости передачи данных и низкой вычислительной сложности. Авторы применили пять процедур: одномерное вейвлет-разложение, пороговую функцию, квантование, кодирование Хаффмана и реконструкцию с использованием нескольких семейств вейвлет-фильтров. Реализация была оценена на основе ОСШ, ПОСШ, СКО, КС и испытана на 8-битном цифровом речевом сигнале с частотой дискретизации 8 кГц. Результаты исследования показали, что вейвлет-фильтр Добеши 10-го порядка дает более высокое ОСШ, чем другие вейвлет-фильтры, степень сжатия увеличивается до 4,31 раза с удовлетворительным качеством декодированных речевых сигналов и скорость передачи речевых данных была снижена с 64 Кбит/с до 13 Кбит/с [4].

Подробно рассмотрена еще одна статья, где предложено использовать разработанный алгоритм сжатия цифровых речевых сигналов на основе ВП, который позволяет добиться неплохих результатов в улучшении степени сжатия данных при сохранении разборчивости речевых сигналов. На базе представленных в статье результатов исследования, можно наглядно ознакомиться на каких скоростях, с какой степенью сжатия работает алгоритм с соответствующим критерием качества. Оптимальным решением, с точки зрения разборчивости, при неплохом сжатии будет работа представленного алгоритма сжатия речевых сигналов со СПБ = 9 (9,1) Кбит/с, что выдает результат КС = 7 (7,1), при этом главные показатели критерия качества речи КК = 0,9701 (0,9710), ОСШ = 12,3023 (12,4302) дБ, ПОСШ = 35,1537 (35,2817) дБ и СКО = 0,2426 (0,2390) дают достаточно высокие результаты в заданных параметрах СПБ и КС условиях [5].

В следующей статье была разработана и исследована модель устройства передачи цифрового речевого сигнала по каналу связи. В качестве преобразования речевого сигнала было выбрано ВП. Данное преобразование имеет преимущества по сравнению с популярным на настоящий момент косинусным преобразованием, так как оно обладает адаптивностью для получения необходимой степени сжатия, сохраняя при этом необходимое качество сигнала. Проведенные исследования показали, что не существует вейвлет-функции одинаково хорошо представляющей все участки речевого сигнала, так как

более гладкие вейвлеты создают более гладкую аппроксимацию сигнала, и наоборот – «короткие» вейвлеты лучше отслеживают пики аппроксимируемой функции. Для звонких звуков предпочтительно использовать вейвлеты Добеши низких порядков, за исключением первого порядка (вейвлет Хаара), так как он имеет резкие перепады, что плохо сказывается на представлении низкочастотных составляющих. Для глухих звуков предпочтительно использовать Койфлеты или вейвлеты Добеши высоких порядков. Изложенные в рассмотренной статье результаты экспериментального исследования применения данных алгоритмов в разработанной модели показали, что алгоритм арифметического сжатия требует на много больше вычислительных затрат. При этом степень сжатия, которая непосредственно зависит от сжимаемых данных не всегда больше, чем при использовании алгоритма Хаффмана. Поэтому в конечной реализации эффективнее применять кодер Хаффмана. Исследования модели разработанного устройства, показали, что устройство работает на скоростях 9-16 Кбит/с при сохранении высокого качества речевого сигнала [6].

Предлагаемые в указанных источниках решения эффективного сжатия речевых сигналов, снижают объем передаваемых данных, однако, как правило, это достигается значительным усложнением аппаратной реализации устройств кодирования и восстановления речевых сигналов, требующих применения высокопроизводительных процессоров.

Перечисленные факторы делают представленные идеи в публикациях непригодными для решения главной задачи, поставленной в данной статье, а именно создание алгоритма сжатия речевых сигналов, адаптированного под систему речевого управления функциями БПЛА, так как мировая тенденция в области разработки БПЛА ведет к тому, что себестоимость оборудования БПЛА будет уменьшаться, и вызвано это тем, что БПЛА, как показывает практика, выполняют локальные задачи и в связи с этим очень часто случаются физические повреждения оборудования БПЛА. Исходя из этого, следует разрабатывать как можно менее экономически расходные проекты и создавать менее вычислительно-затратные варианты решения поставленных задач.

Вместе с тем, основная проблема представленных в публикациях методов и алгоритмов это не возможность применения их в области сжатия сигналов речевых команд для управления функциями БПЛА, так как сигнал на приемной стороне должен быть приемлемого качества для распознавания субъекта управления, то есть, достаточно грубое сжатие повлечет за собой не возможность провести идентификацию легального субъекта управления, а слабое сжатие будет давать в итоге большую избы-

точность передаваемых речевых данных, поток которых будет проблематично защитить от несанкционированного перехвата.

При рассмотрении данной задачи возникает главная проблема, связанная с поиском компромисса между повышением степени сжатия передающих речевых команд, дабы сократить избыточность речевого потока, тем самым, увеличивая пропускную способность радиоканала связи и обеспечением достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления.

Обозначенные проблемы могут быть успешно решены с применением разработанного алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП с применением энтропийного арифметического кодирования, который позволит добиться нужного результата в улучшении степени сжатия передаваемых речевых данных при сохранении достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления, что, в свою очередь, обеспечит передачу речевых данных на низких скоростях и уменьшение потока передаваемой информации, тем самым увеличивая пропускную способность радиоканалов передачи.

## 2. Постановка проблемы

Цель статьи:

1. Разработать алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП с применением энтропийного арифметического кодирования, который позволит добиться нужного результата в улучшении степени сжатия передаваемых речевых данных при сохранении достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления, что, в свою очередь, обеспечит передачу речевых данных на низких скоростях и уменьшение потока передаваемой информации, тем самым увеличивая пропускную способность радиоканала передачи.

2. Экспериментально доказать и обосновать целесообразность использования разработанного алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП.

Научная новизна статьи:

1. Разработан модифицированный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП, который позволяет повысить эффективность кодирования речевой ин-

формации при передаче данных по радиоканалу связи с низкой пропускной способностью.

2. Предложен алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП, который позволит добиться нужного результата в улучшении степени сжатия передаваемых речевых данных при сохранении достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления.

3. Впервые сформулирована задача создания системы голосового радиоуправления функциями БПЛА посредством речевых команд легальных субъектов управления, где в радиоканал связи передаются исключительно речевые сигналы.

Задачи экспериментального исследования:

1. Исследовать разработанный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП в программном пакете MATLAB.

2. Рассчитать СПБ, КС, КК, ОСШ, ПОСШ и СКО экспериментальных записей сигналов речевых команд до и после применения предложенного алгоритма сжатия.

3. Осуществить сравнительную оценку КС, КК, ОСШ, ПОСШ и СКО в зависимости от СПБ.

4. Осуществить сравнительную оценку СПБ, КК, ОСШ, ПОСШ и СКО в зависимости от КС.

5. На базе полученных результатов исследования обосновать и экспериментально доказать целесообразность использования разработанного алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП.

Актуальность исследования.

Разработанный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП обеспечивает оптимальные решения актуальных задач, таких как сжатие речевых данных, максимальное качество речевого сигнала при определенном уровне сжатия, возможность освобождения части полосы частот радиоканала связи для передачи дополнительных цифровых данных, скрытность передаваемой речевой информации, возможность реализовать разработанный алгоритм на микропроцессорах с низкой производительностью с целью снижения стоимости разрабатываемого устройства.

Практическое значение исследования.

Разработанный и исследованный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП обеспечивает уменьшение объема передаваемых цифровых речевых данных с учетом достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распо-

знавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления, благодаря чему увеличивается пропускная способность используемого радиоканала связи. Полученные результаты экспериментального исследования позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего практического применения предложенного алгоритма сжатия сигналов речевых команд на основе ВП в разрабатываемой системе голосового радиоуправления функциями БПЛА.

### 3. Результаты исследований

В работе приводится разработанный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП с применением энтропийного арифметического кодирования (рис. 1). Достижения в области цифровой микросхемотехники является фундаментом практического внедрения методов цифровой передачи речевых сигналов. На основе таких методов созданы системы высококачественной передачи, которые способны функционировать в реальных условиях и обеспечивают распознавание речи на фоне шумов и помех.

Цель кодирования речи заключается в уменьшении числа битов, отражающие заданное количество информации, при этом избыточность цифрового речевого сигнала уменьшается, что позволяет использовать канал связи с меньшей полосой пропускания.

В проведенном экспериментальном исследовании в качестве входных цифровых сигналов речевых команд в исследуемом алгоритме сжатия используются записи мужских голосов с частотой дискретизации 8 кГц и разрядностью квантования 8 бит на отсчет, из чего следует, что поток битовой последовательности речевых данных на входе алгоритма сжатия составит – 64 Кбит/с. Данная скорость речевого потока является чрезмерно избыточной в задачах реализации системы голосового радиоуправления функциями БПЛА.

Основной задачей алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА является уменьшение потока передаваемых речевых данных по цифровому радиоканалу связи при незначительном ухудшении качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления.

Цифровой речевой поток произнесенной команды, поступающий с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на вход разработанного алгоритма сжатия на основе ВП, прежде всего, разделяется на 20-миллисекундные сегменты речи, содержащие по 160 отсчетов (1280 бит).

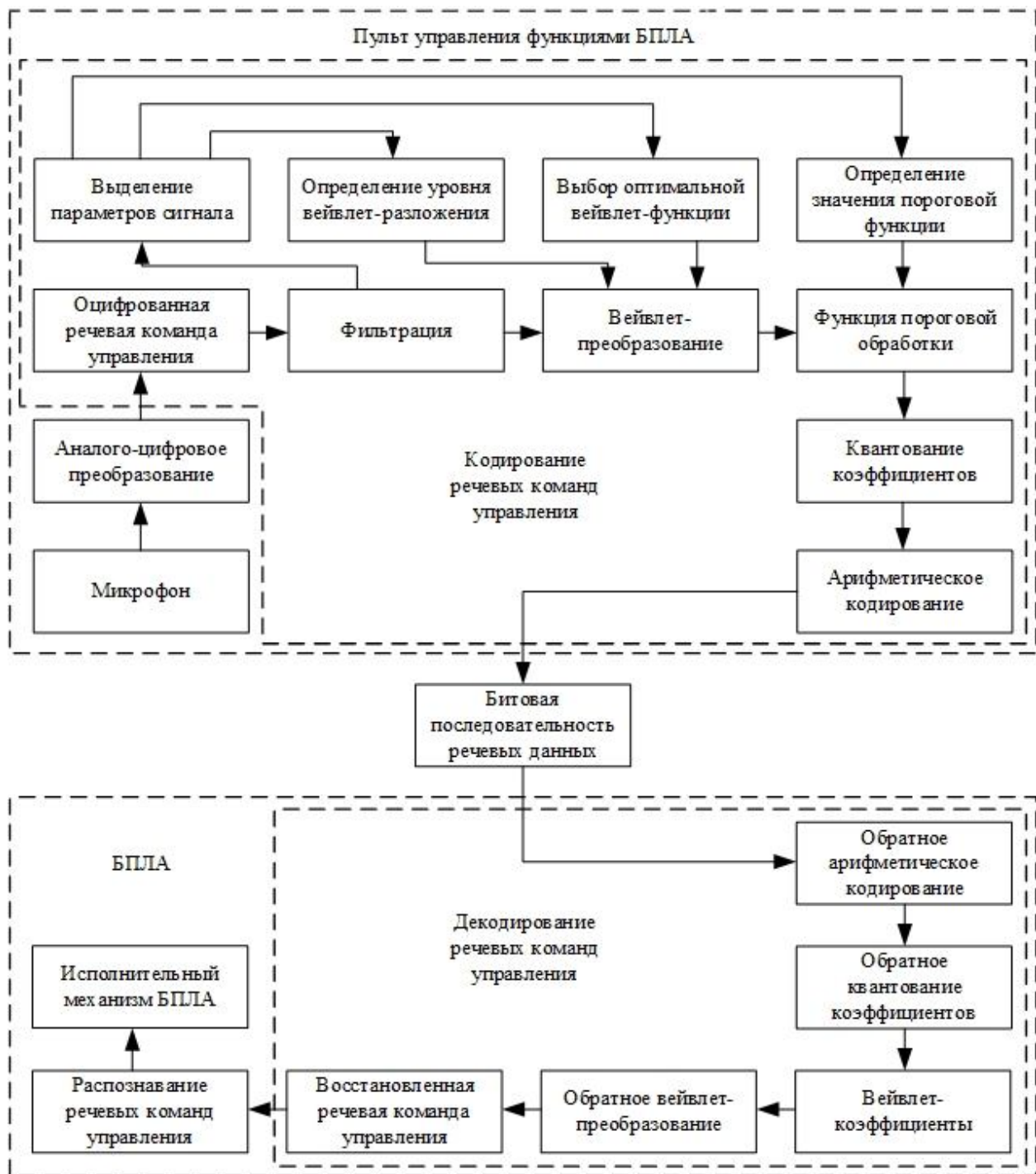


Рис. 1. Алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП с применением энтропийного арифметического кодирования

Сжатие сигналов речевых команд управления, согласно разработанного алгоритма, происходит в несколько этапов.

На первом этапе для подавления шума и нормализации полосы частот оцифрованный сигнал речевой команды поступает на полосовой фильтр Баттерворта  $2n$ -го порядка, где  $n=5$  с полосой пропускания 300...2600 Гц, который представляется в виде векторов-строк  $b$  и  $a$ , имеющих длину

$2n+1$  и содержащих коэффициенты полиномов числителя и знаменателя функции передачи в порядке убывания степеней переменной  $z$ :

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}}$$

Основываясь на результатах экспериментального исследования представленных на рис. 2, которые наглядно показывают, что на полосе частот

2600...3400 Гц сосредоточено довольно мало важной информационной составляющей сигналов речевых команд управления для задач распознавания речевых команд, было принято решение взять за основу полосу пропускания 300...2600 Гц, где ширина полосы пропускания – 2300 Гц (2,3 кГц) [7].

На рис. 3 изображен график амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) синтезированного фильтра Баттерворта 10-го порядка с полосой пропускания 300...2600 Гц, (2,3 кГц).

Поскольку речевой сигнал представляет собой нестационарный случайный процесс, то для его обработки было предложено использовать дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) на вход которого, поступают отсчеты сигналов речевых команд, а на выходе образуются вейвлет-коэффициенты (ВК) [8].

Обратимся к схеме, представленной на рис. 4а. Сигнал  $f(k)$  подается на фильтр низких частот (ФНЧ) и фильтр высоких частот (ФВЧ), в которых вычисляется свертка (цифровая фильтрация) по формуле:  $y(k) = \sum_{l=0}^{2n-1} f(k)q(k-l)$ , где  $2n$  – число от-

счетов импульсной характеристики вейвлет-фильтра  $q(k)$ . Соответственно на выходе фильтров будет высокочастотная  $u_H(k)$  и низкочастотная  $u_L(k)$  компоненты сигнала. При переходе от текущего уровня вейвлет-разложения к следующему выполняется децимация  $\downarrow 2$  с фактором 2, то есть прореживание сигналов на выходе фильтров в два раза, после которой образуются ВК аппроксимации  $a_{1k}$  и детализации  $d_{1k}$ . На следующем уровне разложения, вместо сигнала  $f(k)$  на ФНЧ и ФВЧ подаются ВК аппроксимации  $a_{1k}$ , а ВК детализации  $d_{1k}$  остаются неизменными [9].

Схема, представленная на рис. 4б осуществляет вейвлет-реконструкцию сигнала. Эта процедура использует операции интерполяции  $\uparrow 2$  и фильтрации фильтрами реконструкции ФНЧ и ФВЧ. Операция интерполяции с фактором 2, обратная децимации с фактором 2, осуществляется путем увеличения в два раза числа составляющих добавлением нулевых компонентов.

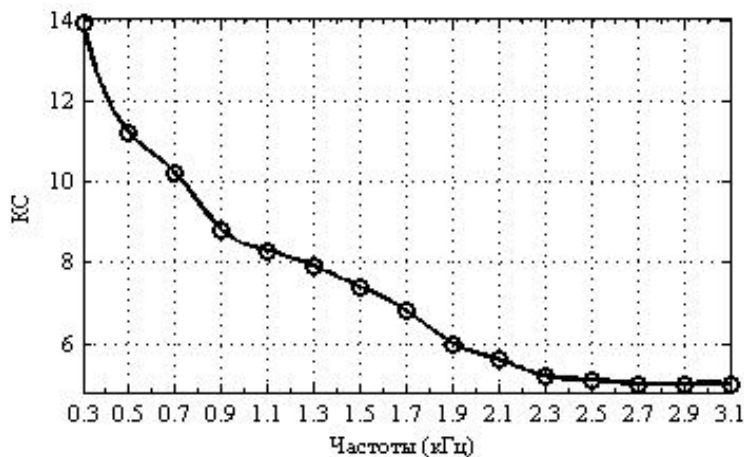


Рис. 2. Зависимость КС от ширины полосы пропускания полосового фильтра Баттерворта 10-го порядка

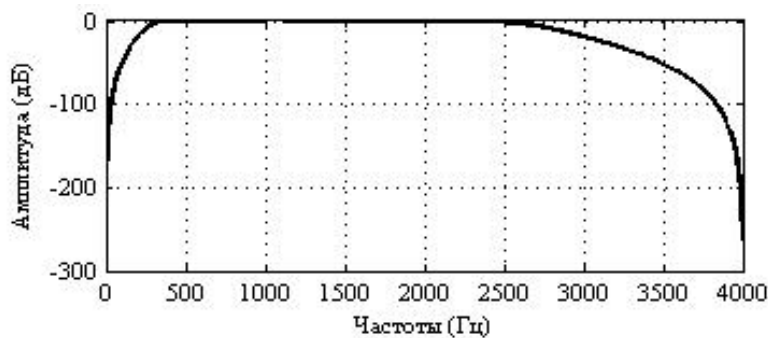


Рис. 3. АЧХ полосового фильтра Баттерворта 10-го порядка с полосой пропускания 300...2600 Гц

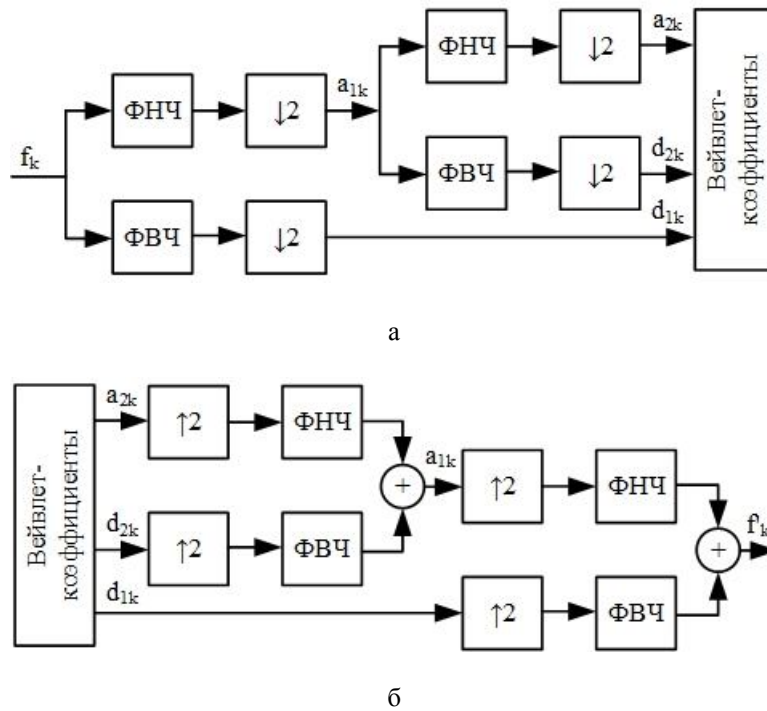


Рис. 4. Схема выполнения ДВП на базе частотной фильтрации: а – алгоритм декомпозиции, б – алгоритм реконструкции

При сложении сигналов, полученных на выходе ФНЧ и ФВЧ на всех уровнях, произойдет реконструкция сигнала на начальном уровне.

Исходя из проведенного ранее экспериментального исследования в качестве значений импульсной характеристики вейвлет-фильтра  $q(k)$ , целесообразно использовать порождающую вейвлет-функцию Добеши 12-го порядка [10].

Основное свойство ДВП заключается в том, что преобразованный сигнал представляется большим количеством избыточных ВК, которые после пороговой обработки будут обнулены.

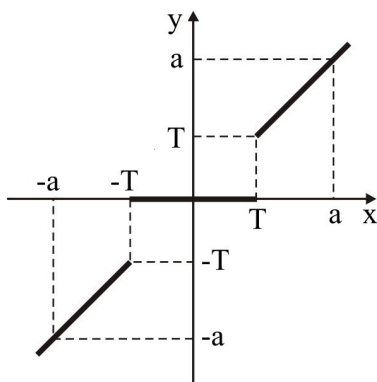


Рис. 5. Пороговая функция обработки ВК

Обнуление ВК происходит с помощью заданной пороговой функции, ВК ниже или равны которой будут приравнены к нулю, а все остальные ос-

танутся без изменений. ВК с абсолютным значением близким к нулю содержат лишь небольшую часть энергии сигнала. Обнуление этих ВК приводит к незначительным потерям энергии. Это свойство делает ДВП привлекательными для сжатия сигналов речевых команд [11].

На рис. 5 представлена пороговая функция, описываемая следующим выражением:

$$y(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \geq T, \\ 0, & \text{если } |x| < T. \end{cases}$$

Здесь в качестве величины  $T$  выступает некоторое пороговое значение, а в качестве  $x$  и  $y$  выступают входное и выходное значения ВК, соответственно. Повышение порога будет повышать степень сжатия, но, вместе с тем, будет уменьшаться качество сигналов речевых команд. Снижение порога позволяет уменьшить потери информационных ВК, но, также снижается эффективность сжатия сигналов речевых команд.

Так как ВК детализации и аппроксимации являются вещественными числами, то перед тем как выполнить сжатие сигналов речевых команд методом арифметического кодирования, необходимо преобразовать ВК, прошедшие пороговую обработку, в целый числовой диапазон, соответствующий выбранному формату. В противном случае потоки сжатых ВК будут больше потоков сигналов речевых команд. Данную операцию можно выполнить при помощи квантования. При этом возникнет ошибка

квантования, которая вносит дополнительные искажения в передаваемые речевые сигналы [12].

На заключительном этапе алгоритма сжатия, квантованные ВК, кодируются методом энтропийного арифметического кодирования, в результате которого на выходе образуется сжатая битовая последовательность речевых данных команд управления функциями БПЛА.

Отличительная особенность арифметического кодирования от известных методов кодирования заключается в том, что ни кодер, ни декодер не хранят все возможное множество кодовых слов. Вместо этого при передаче конкретной последовательности  $x$  вычисляется кодовое слово  $c(x)$  только для заданной последовательности  $x$ . Правило кодирования известно декодеру и он восстанавливает  $x$  по  $c(x)$ , не имея полного списка кодовых слов.

В статье был исследован разработанный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП и проведено моделирование в программном пакете MATLAB, в частности были осуществлены оценивания КС данных и СПБ в зависимости от параметров КК, ОСШ, ПОСШ и СКО, которые выступают главными показателями критерия качества сигналов речевых команд.

Первый эксперимент (табл. 1) был проведен с учетом критерия, в роли которого выступала СПБ на выходе алгоритма сжатия речи, в зависимости от которой изменялись значения КС, КК, ОСШ,

ПОСШ и СКО, тем самым, давая объективную оценку качества сигналов речевых команд и уровня сжатия речевых данных при работе разработанного алгоритма сжатия на основе ВП на заданной СПБ.

Второй эксперимент (табл. 2) был проведен с учетом первичного критерия, в роли которого выступал КС речевых данных, в зависимости от которого изменялись значения СПБ, КК, ОСШ, ПОСШ и СКО, тем самым, давая объективную оценку качества сигналов речевых команд управления функциями БПЛА и скорости передачи речевых данных при работе алгоритма в режиме с заданным КС.

Из представленных выше результатов исследования (см. табл. 1, 2) наглядно видно, что оптимальным решением по критерию соотношения качества сигналов речевых команд от уровня сжатия передаваемых данных будет работа представленного алгоритма сжатия со СПБ = 8 Кбит/с, что позволяет сохранить достаточно приемлемый КС = 8, при этом главные показатели критерия качества сигналов речевых команд КК = 0,9674 (0,9673), ОСШ = 11,9329 (11,9213) дБ, ПОСШ = 35,0363 (35,0245) дБ и СКО = 0,2531 (0,2535) показывают довольно высокие результаты, сохраняя индивидуальные характеристики голоса субъекта управления, что дает возможность точного распознавания речевых команд управления функциями БПЛА и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления на приемной стороне системе голосового радиоуправления функциями БПЛА.

Таблица 1

Отношение зависимости КС, КК, ОСШ, ПОСШ, СКО от СПБ

СПБ (Кбит/с) выход	СПБ (Кбит/с) вход	КС	КК	ОСШ (дБ)	ПОСШ (дБ)	СКО
7	64	9,1	0,9567	10,7190	33,8999	0,2911
8	64	8	0,9674	11,9329	35,0363	0,2531
9	64	7,1	0,9750	13,0732	36,1438	0,2220
10	64	6,4	0,9807	14,1775	37,4021	0,1955
11	64	5,8	0,9851	15,2810	38,4896	0,1722
12	64	5,3	0,9886	16,4407	39,6629	0,1506

Таблица 2

Отношение зависимости СПБ, КК, ОСШ, ПОСШ, СКО от КС

КС	СПБ (Кбит/с) выход	СПБ (Кбит/с) вход	КК	ОСШ (дБ)	ПОСШ (дБ)	СКО
5	12,8	64	0,9907	17,3374	40,5606	0,1359
6	10,6	64	0,9836	14,8819	38,0955	0,1803
7	9,1	64	0,9759	13,2237	36,2976	0,2182
8	8	64	0,9673	11,9213	35,0245	0,2535
9	7,1	64	0,9579	10,8414	34,0217	0,2870
10	6,4	64	0,9484	9,9750	33,0762	0,3171



## Выводы

В данной статье представлен разработанный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП с применением арифметического кодирования и проведено моделирование в программном пакете MATLAB.

Разработан алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП, который позволит добиться нужного результата в улучшении степени сжатия передаваемых речевых данных при сохранении достаточного качества сигналов на приемной стороне для возможности точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления, что, в свою очередь, обеспечит передачу речевых данных на низких скоростях и уменьшение потока передаваемой информации, тем самым увеличивая пропускную способность радиоканала передачи.

Экспериментально доказана и обоснована целесообразность использования разработанного алгоритма сжатия цифровых сигналов речевых команд управления на основе ВП в задачах голосового радиопередачи функциями БПЛА. Проведена сравнительная оценка КК, ОСШ, ПОСШ и СКО в зависимости от СПБ и КС.

Разработанный алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями БПЛА на основе ВП решает главную проблему, связанную с поиском компромисса между повышением степени сжатия передающих речевых команд, дабы сократить избыточность речевого потока, тем самым, увеличивая пропускную способность радиоканала связи и обеспечением достаточного качества сигналов на приемной стороне.

На базе полученных результатов исследования (табл. 1, 2) можно наглядно ознакомиться на каких скоростях, с какой степенью сжатия работает алгоритм с соответствующим критерием качества сигналов речевых команд управления.

Оптимальным решением, с точки зрения качества сигналов речевых команд при достаточно неплохом сжатии данных, будет работа представленного алгоритма сжатия со СПБ = 8 Кбит/с, что выдает результат КС = 8, при этом главные показатели критерия качества сигналов речевых команд – КК = 0,9674 (0,9673), ОСШ = 11,9329 (11,9213) дБ, ПОСШ = 35,0363 (35,0245) дБ и СКО = 0,2531 (0,2535) показывают довольно высокие результаты, что дает возможность точного распознавания речевых команд и выполнения голосовой аутентификации легальных субъектов управления на приемной стороне.

Полученные результаты экспериментального исследования позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего практического применения предложенного алгоритма сжатия сигналов речевых команд управления на основе ВП в разрабатываемой системе голосового радиопередачи функциями БПЛА.

## Литература

1. Carnero, B. *Perceptual speech coding and enhancement using frame-synchronized fast wavelet packet transform algorithms* [Electronic resource] / B. Carnero, A. Drygajlo // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1999. – Vol. 47, No. 6. – P. 1622–1635. – Access mode: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=765133&filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A16552%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=765133&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A16552%29). – 20.04.2016.
2. Xiaodong, W. *Multi-domain speech compression based on wavelet packet transform* [Electronic resource] / W. Xiaodong, L. Yongming, C. Hongyi // *Electronics Letters*. – 1998. – Vol. 34, No. 2. – P. 154–155. – Access mode: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=653168&filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A14241%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=653168&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A14241%29). – 20.04.2016.
3. *Сравнительный анализ преобразования Фурье, косинусного преобразования и вейвлет-преобразования в качестве спектрального анализа цифровых речевых сигналов* [Электронный ресурс] / Г. Ф. Конахович, О. И. Давлет'яни, О. Ю. Лавриненко, Д. И. Бахтияров // *Наукоємні технології*. – 2015. – № 3 (27). – P. 210–220. – Режим доступа: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/9387>. – 20.04.2016.
4. *Speech compression using discrete wavelet transform* [Electronic resource] / A. M. Najih, A. R. Ramli, V. Prakash, A. R. Syed // *Telecommunication Technology. NCTT Proceedings. 4th National Conference, 14-15 Jan. 2003*. – 2003. – Vol. 1. – P. 1–4. – Access mode: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1188289&filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A26640%29%26pageNumber%3D2](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1188289&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A26640%29%26pageNumber%3D2). – 20.04.2016.
5. *A digital speech signal compression algorithm based on wavelet transform* [Text] / G. F. Konakhovich, O. Y. Lavrynenko, V. V. Antonov, D. I. Bakhtiarov. // *Electronics and Control Systems*. – 2016. – Vol. 48, No. 2. – P. 29–35.
6. Бейлекчи, Д. В. *Модель устройства передачи цифрового речевого сигнала по каналу связи* [Текст] / Д. В. Бейлекчи // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. – 2007. – № 8. – С. 83–89.
7. Goswami, J. C. *Fundamentals of wavelets: Theory, algorithms, and applications* [Electronic resource] / J. C. Goswami, A. K. Chan. – 2nd ed. – New York : Wiley-Interscience, 1999. – 324 p. – Access mode: [ftp://ftp.shahroodut.ac.ir/Schools/Electrical/Dr%20Hadi%20Grailu/Wavelet%20Course/Fundamentals\\_](ftp://ftp.shahroodut.ac.ir/Schools/Electrical/Dr%20Hadi%20Grailu/Wavelet%20Course/Fundamentals_)

*of Wavelets Theory Algorithms and Applications – Second Edition.pdf*. – 20.04.2016.

8. Daubechies, I. *Ten lectures on wavelets [Electronic resource]* / I. Daubechies // *CBMS-NSF conference series in applied mathematics, 1992*. – 377 p. – Access mode: <http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/mathematics/abstract-analysis/ten-lectures-wavelets>. – 20.04.2016.

9. Nelson, M. *The Data Compression Book [Electronic resource]* / M. Nelson. – 2nd ed. – M&T books, 1995. – 370 p. – Access mode: <http://lib.mdp.ac.id/ebook/Karya%20Umum/The-Data-Compression-Book.pdf>. – 20.04.2016.

10. Mallat, S. *A Wavelet Tour of Signal Processing, 3rd Edition [Electronic resource]* / S. Mallat. – Paris : Academic Press, 2008. – 832 p. Access mode: [http://electrolib.com/library/math/Mallat\\_Wavelet-Tour-of-Signal-Processing.pdf](http://electrolib.com/library/math/Mallat_Wavelet-Tour-of-Signal-Processing.pdf). – 20.04.2016.

11. Taswell, C. *The systematized collection of Daubechies wavelets [Electronic resource]* / C. Taswell. – Stanford: Computational Toolsmiths, 1998. – 50 p. – Access mode: <http://www.toolsmiths.com/docs/ct199806.pdf>. – 20.04.2016.

12. Strang, G. *Wavelets and Filter Banks [Electronic resource]* / G. Strang, T. Nguyen. – Well.-Camb. Press, 1996. – 500 p. – Access mode: <http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/mathematics/numerical-analysis/wavelets-and-filter-banks-2nd-edition?format=HB&isbn=9780961408879>. – 20.04.2016.

## References

1. Carnero, B., Drygajlo, A. Perceptual speech coding and enhancement using frame-synchronized fast wavelet packet transform algorithms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, vol. 47, no. 6, pp. 1622-1635. Available at: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=765133&filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A16552%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=765133&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A16552%29) (accessed 20.04.2016).

2. Xiaodong, W., Yongming, L., Hongyi, C. Multi-domain speech compression based on wavelet packet transform. *Electronics Letters*, 1998, vol. 34, no. 2, pp. 154-155. Available at: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=653168&filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A14241%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=653168&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A14241%29) (accessed 20.04.2016).

3. Konahovich, G. F., Davletyants, O. I., Lavrynenko, O. Y., Bakhtiyarov, D. I. The comparative analysis the Fourier transform, cosine transform and wavelet transform as a spectral analysis of the digital speech signals, *Science-Based Technologies*, 2015, vol. 27, no. 3, pp. 210-220. Available at: <http://jrnل.nau.edu>

[ua/index.php/SBT/article/view/9387](http://index.php/SBT/article/view/9387) (accessed 20.04.2016).

4. Najih, A. M., Ramli, A. R., Prakash, V., Syed, A. R. Speech compression using discrete wavelet transform. *Telecommunication Technology. NCTT Proceedings. 4th National Conference, 2003*, vol. 1, pp. 1-4. Available at: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1188289&filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A26640%29%26pageNumber%3D2](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1188289&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A26640%29%26pageNumber%3D2) (accessed 20.04.2016).

5. Konakhovych, G. F., Lavrynenko, O. Y., Antonov, V. V., Bakhtiyarov, D. I. A digital speech signal compression algorithm based on wavelet transform. *Electronics and Control Systems*, 2016, vol. 48, no. 2, pp. 29-35.

6. Beylekchi, D. V. Model ustroystva peredachi tsifrovogo rechevogo signala po kanalu svyazi. *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii*, 2007, no. 8, pp. 83-89. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15639901> (accessed 20.04.2016).

7. Goswami, J. C., Chan, A. K. *Fundamentals of wavelets: Theory, algorithms, and applications*. New York, Wiley-Interscience Publ., 1999. 324 p. Available at: [ftp://ftp.shahroodut.ac.ir/Schools/Electrical/Dr%20Hadi%20Grailu/Wavelet%20Course/Fundamentals\\_of\\_Wavelets\\_Theory\\_Algorithms\\_and\\_Applications\\_Second\\_Edition.pdf](ftp://ftp.shahroodut.ac.ir/Schools/Electrical/Dr%20Hadi%20Grailu/Wavelet%20Course/Fundamentals_of_Wavelets_Theory_Algorithms_and_Applications_Second_Edition.pdf) (accessed 20.04.2016).

8. Daubechies, I. Ten lectures on wavelets. *CBMS-NSF conference series in applied mathematics, 1992*, 377 p. Available at: <http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/mathematics/abstract-analysis/ten-lectures-wavelets> (accessed 20.04.2016).

9. Nelson, M. *The Data Compression Book, 2nd ed.* M&T books Publ., 1995. 370 p. Available at: <http://lib.mdp.ac.id/ebook/Karya%20Umum/The-Data-Compression-Book.pdf> (accessed 20.04.2016).

10. Mallat, S. *A Wavelet Tour of Signal Processing, 3rd Edition*. Paris, Academic Press Publ., 2008. 832 p. Available at: [http://electrolib.com/library/math/Mallat\\_Wavelet-Tour-of-Signal-Processing.pdf](http://electrolib.com/library/math/Mallat_Wavelet-Tour-of-Signal-Processing.pdf) (accessed 20.04.2016).

11. Taswell, C. *The systematized collection of Daubechies wavelets*. Stanford, Computational Toolsmiths Publ., 1998. 50 p. Available at: <http://www.toolsmiths.com/docs/ct199806.pdf> (accessed 20.04.2016).

12. Strang, G., Nguyen, T. *Wavelets and Filter Banks*, Well.-Camb. Press Publ., 1996. 500 p. Available at: <http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/mathematics/numerical-analysis/wavelets-and-filter-banks-2nd-edition?format=HB&isbn=9780961408879> (accessed 20.04.2016).

**АЛГОРИТМ СТИСНЕННЯ СИГНАЛІВ МОВНИХ КОМАНД УПРАВЛІННЯ  
ФУНКЦІЯМИ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА****О. Ю. Лавриненко, Г. Ф. Конахович, Р. С. Одарченко, Д. І. Бахтіяров**

Запропоновано використовувати розроблений алгоритм стиснення цифрових сигналів мовних команд управління на основі вейвлет-перетворення в задачах голосового радіоуправління функціями безпілотного літального апарата. Досліджений алгоритм дозволяє домогтися оптимального результату в поліпшенні ступеня стиснення переданих мовних даних при збереженні достатньої якості сигналів на приймальній стороні для можливості точного розпізнавання мовних команд і виконання голосової аутентифікації легальних суб'єктів управління. Обґрунтовано та експериментально доведено доцільність використання представленого алгоритму стиснення сигналів мовних команд управління функціями безпілотного літального апарата на основі вейвлет-перетворення. Отримані результати експериментального дослідження дозволяють зробити висновок про доцільність подальшого практичного застосування запропонованого алгоритму стиснення сигналів мовних команд управління на основі вейвлет-перетворення в розроблювальній системі голосового радіоуправління функціями безпілотного літального апарата.

**Ключові слова:** алгоритм стиснення, безпілотний літальний апарат, голосове управління, голосова аутентифікація, мовні сигнали, вейвлет-перетворення, арифметичне кодування.

**VOICE COMMAND SIGNAL COMPRESSION ALGORITHM  
BY FUNCTIONS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES****O. Y. Lavrynenko, G. F. Konakhovych, R. S. Odarchenko, D. I. Bakhtiarov**

It is proposed to use developed digital speech signal compression algorithm based on wavelet transform in tasks of voice radio control by functions of an unmanned aircraft. The algorithm allows to achieve optimal results in improving the compression ratio of transmitted voice data while maintaining sufficient signal quality at the receiving side to enable accurate recognition of speech commands and perform legal control entities. Substantiated and experimentally proved the feasibility of using the voice command signal compression algorithm by functions of unmanned aerial vehicles based on wavelet transform. The results of experimental studies suggest the feasibility of further practical application of the proposed voice command signal compression algorithm based on wavelet transform in the system of voice radio control by functions of an unmanned aircraft.

**Key words:** compression algorithm, unmanned aircraft, voice control, voice authentication, speech signal, wavelet transform, arithmetic coding.

**Лавриненко Александр Юрьевич** – аспирант, ассистент каф. телекоммуникационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

E-mail: [oleksandravrynenko@gmail.com](mailto:oleksandravrynenko@gmail.com)

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7738-161X>

**Конахович Георгий Филимонович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. телекоммуникационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

**Одарченко Роман Сергеевич** – канд. техн. наук, доц. каф. телекоммуникационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

**Бахтияров Денис Илшатович** – аспирант, ассистент каф. телекоммуникационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

**Oleksandr Lavrynenko** – Graduate Student, Assistant to Department of Telecommunication Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [oleksandravrynenko@gmail.com](mailto:oleksandravrynenko@gmail.com)

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7738-161X>

**Georgy Konakhovych** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Telecommunication Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Roman Odarchenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Telecommunication Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Denis Bakhtiarov** – Graduate Student, Assistant to Department of Telecommunication Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.