

DOI 10.66032/2221-2574-2026-1-1-30-37

УДК 623.746

**МЕТОД АДАПТИВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БПЛА****Самойлов Владислав Сергеевич**

ассистент кафедры радиотехники и радиосистемы ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

E-mail для связи: [insertend175@gmail.com](mailto:insertend175@gmail.com)

*Аннотация:* Предложен принцип построения адаптивного канала управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) малой дальности действия. Разработаны алгоритмы адаптивной перестройки параметров канала связи в зависимости от оценки качества канала, выполняемой по сигналам управления на стороне БПЛА. Создан аппаратно-программный комплекс для исследования предложенных алгоритмов адаптивной перестройки параметров канала управления БПЛА. Экспериментально показано, что путём адаптивной перестройки параметров канала управления БПЛА до 8 дБ улучшается соотношение сигнал/шум в канале управления.

*Ключевые слова:* адаптация, система связи, управляемый аппарат, канал управления, адаптивные каналы связи, технология LoRa.

**Введение**

Достоверность передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии критически важна для обеспечения надёжной работы в условиях изменяющихся характеристик канала, что и определяет актуальность работы. Особенностью адаптивной системы связи является то, что имеется возможность гибко менять характеристики как блоков информационных данных при передаче, так и сами настройки канала связи [1]. Цель работы состоит в том, чтобы путём использования методов адаптивной перестройки параметров канала управления БПЛА улучшить соотношение сигнал/шум в канале управления. Схема информационного блока представлена на рис. 1.

Одним из важных компонентов передаваемого блока информации является преамбула, которая необходима для того, чтобы обнаружить информационный блок на приёмной стороне [2]. Преамбула состоит из фиксированной последо-

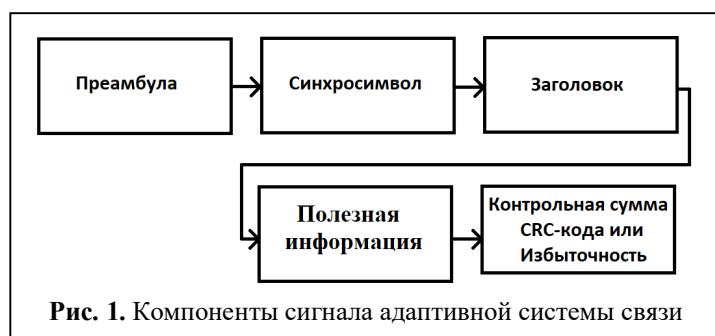
вательности бит, например, преамбула, используемая в устройствах с технологией LoRa, состоит из двоичной последовательности бит длиной от 0 до 65535 символов.

В некоторых системах передачи информации длина преамбулы может варьироваться, что позволяет повышать или понижать вероятность обнаружения блока данных приёмником при воздействии помех.

Синхросимвол указывает в блоке место, где заканчивается преамбула и начинается основная информационная часть. Так как длину преамбулы можно изменять в случае изменения качества канала связи, на приёмной стороне необходимо видеть эту границу.

В заголовок помещается служебная информация, которая содержит в себе длину блока, адрес получателя (для сетей с мульти-узлами), тип данных, номер блока (если необходим порядок восстановления при потере пакета) и дополнительные настройки канала связи.

В полезной нагрузке находится информация, которую требуется передать. Количество информационных блоков целесообразно адаптивно изменять в зависимости от качества принимаемой информации. При высокой достоверности принятой информации имеет смысл увеличивать количество информационных



**Рис. 1.** Компоненты сигнала адаптивной системы связи

блоков, тем самым увеличивая скорость передачи информации и наоборот, снижать количество информационных блоков в ущерб скорости передачи информации при низкой достоверности принятых данных.

В конце блока присутствует контрольная сумма (CRC). Совпадение или несовпадение контрольной суммы говорит об успешном приеме или о том, что блок информации содержит ошибки [3].

Кроме применения CRC, можно использовать помехоустойчивое кодирование [4]. Некоторые помехоустойчивые коды способны не только обнаруживать и исправлять ошибки, но и сообщать, когда количество ошибок больше, чем исправляющая способность кода [5]. Примером такого кода является код Рида-Соломона [6].

Рассмотрим случай, когда на приёмной стороне искажённое кодовое слово

$$r(x) = c(x) + e(x),$$

где  $e(x)$  — вектор ошибок.

Для исправления ошибок синдрома  $S_1, S_2, \dots, S_t$  вычисляются как значения  $r(x)$  в корнях порождающего многочлена. Если все синдромы нулевые, ошибок нет.

С помощью алгоритмов (например, Берлекэмп — Мэсси или Евклида) строится многочлен локаторов ошибок  $L(x)$ , корни которого указывают позиции ошибок. Используя синдромы и позиции вычисляются значения ошибок после чего они устраняются из принятого слова.

Код Рида-Соломона теоретически ограничен исправлением до  $t$  ошибок, где  $t$  — половина от количества избыточных бит. Если количество ошибок  $e > t$ , то исправление всех ошибок невозможно [7].

Если в процессе декодирования обнаруживается, что количество ошибок  $e > t$ , код объявляет ошибку неисправимой. Если степень  $L(x) > t$ , это означает, что  $e > t$ , и декодер прекращает попытки исправления.

Доля ошибочных бит к общему числу принятых (BER — Bit Error Rate)

$$Pp = 1 - \sqrt[1-p_e]{},$$

где  $Pp$  — вероятность ошибки на бит;

$N$  — размер блока;  $p_e$  — вероятность ошибки в блоке.

Это даёт скорее теоретическое понимание о качестве канала связи, так как невозможно понять, какие конкретно биты были потеряны или не восстановлены помехоустойчивым кодом. Можно провести эксперимент, когда на приёмной стороне известна содержащаяся в блоке информация и подсчитывать совпадающие и несовпадающие биты. Но в реальной ситуации такая реализация невозможна, так как неизвестно какие в блоке биты были приняты с ошибкой, а какие нет. После того, как блок был принят системой с ошибкой, он удаляется из памяти устройства, поэтому считать, что все биты были приняты — неправильно.

Блок-схемы функционирования адаптивного канала управления для модуля со стороны оператора и модуля со стороны дрона, представлены на рис. 2, рис. 3. Оба алгоритма прекращают работу только при отключении питания модулей.

Общий алгоритм адаптивного канала управления модернизирован и теперь фиксирует количество принятых блоков ( $K$ ), количество не принятых блоков ( $E$ ), количество принятых блоков с ошибками ( $C$ ) и количество блоков, где ошибки удалось исправить ( $T$ ). На основе полученных значений ( $N, K, E, C, T$ ) определяется текущее качество канала управления. И принимается решение об изменении скорости передачи информации. Всего таких решений может быть три: оставить скорость передачи информации без изменений, увеличить скорость передачи, снизить скорость передачи. Далее определяется скорость передачи информации по каналу управления [8].

Общий алгоритм адаптивного канала управления состоит в следующем. Оба приёмопередающих модуля содержат список возможных режимов приёма и передачи с разной степенью помехоустойчивости и разным количеством блоков передаваемой информации в секунду. При этом, степень помехоустойчивости может зависеть от ширины полосы пропускания сигнала, количества скачков перестройки несущей частоты, кодовой скорости как внешнего, так и внутреннего помехоустойчивого кода, времени

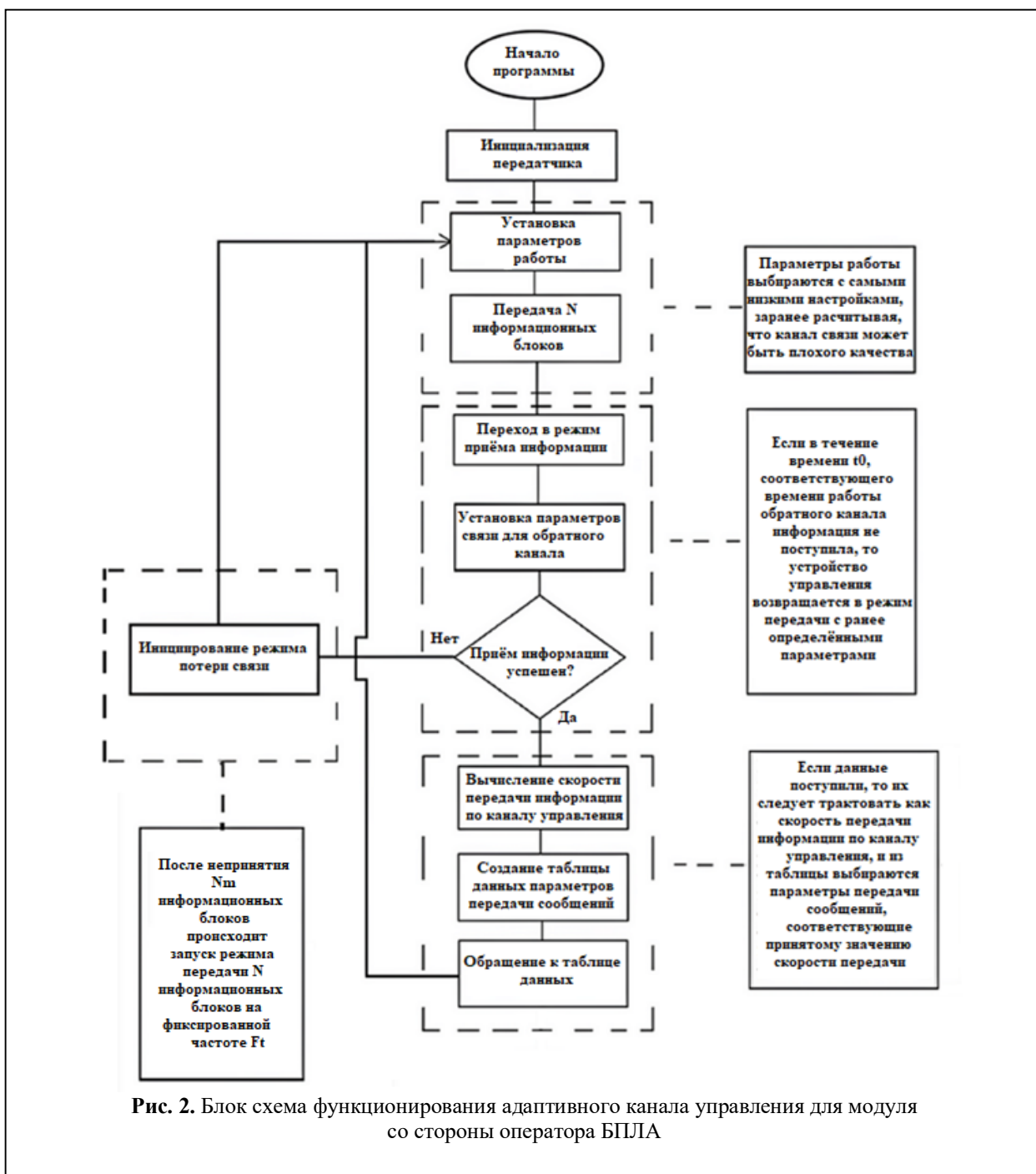
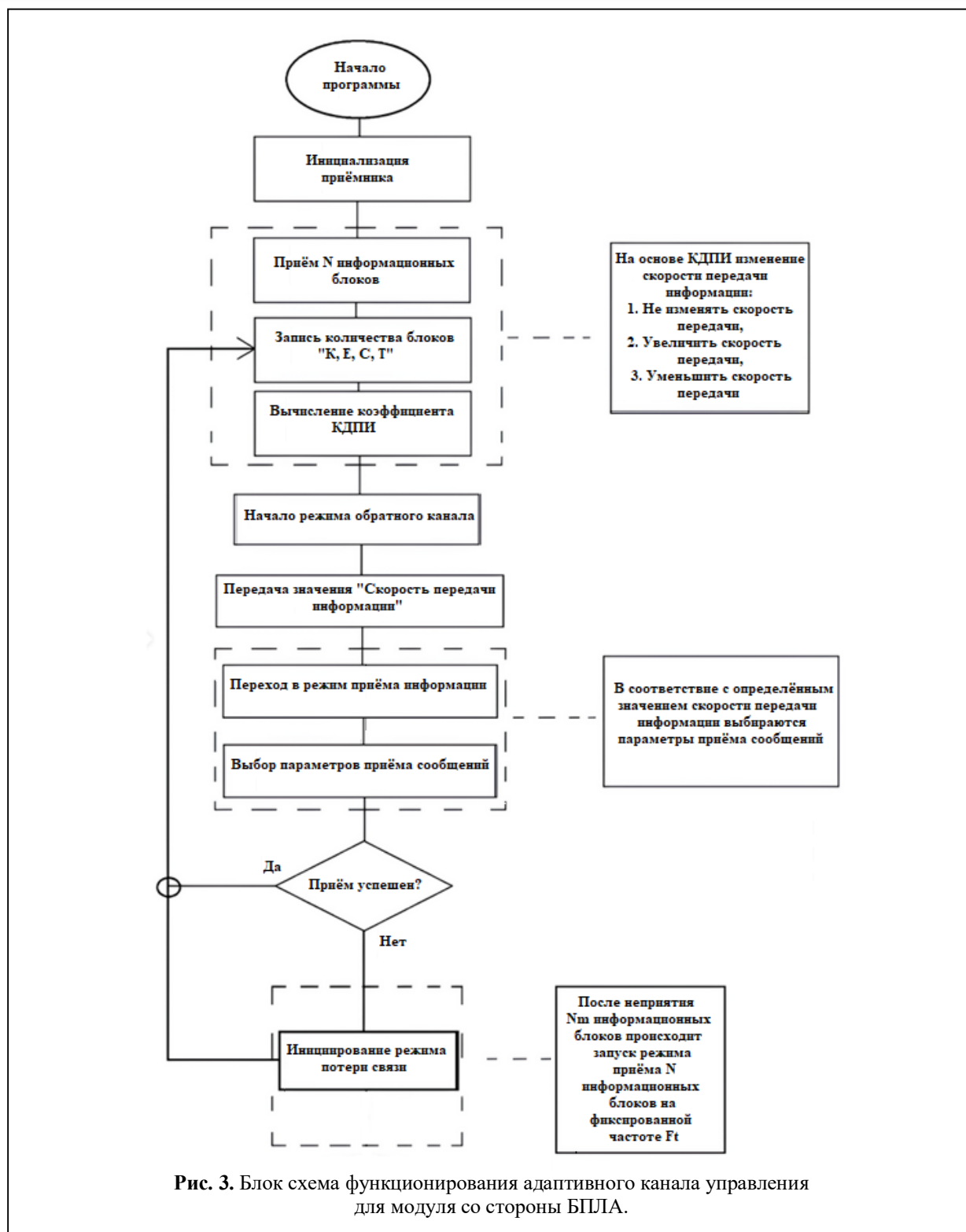


Рис. 2. Блок схема функционирования адаптивного канала управления для модуля со стороны оператора БПЛА

передачи одного блока и длины преамбулы.

Изначально в обоих модулях (на приёме и на передаче) выбраны одинаковые режимы канала связи. Приёмо-передающий модуль со стороны оператора отправляет  $n_i$  блоков управляющей информации, где  $n_i$  соответствует установленному режиму канала связи. После чего переходит в режим приёма. Модуль со стороны беспилотного аппарата принимает  $k$  блоков информации из  $n_i$ ,

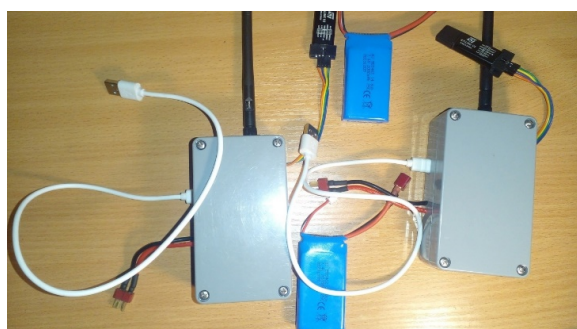
определяет качество канала связи, переходит в режим передачи и отправляет информацию о качестве канала. Далее, основываясь на качестве канала связи, модуль либо изменяет режим канала связи на один из заложенных возможных режимов, либо оставляет существующий, после чего переходит в режим приёма и ожидает  $n_{i+1}$  блоков информации. Приёмо-передающий модуль со стороны оператора принимает значение



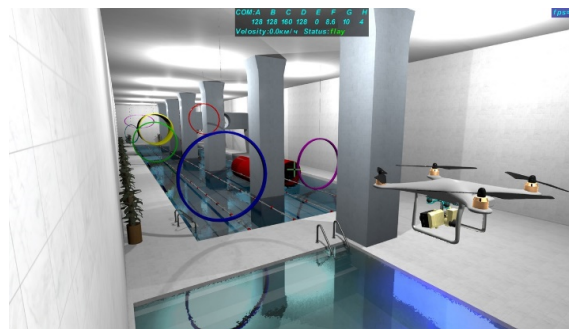
качества канала связи и аналогично изменяет, или оставляет существующий режим канала связи, после чего переходит в режим передачи  $n_{i+1}$  информационных блоков.

Так как приём и передача информации про-

исходит в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), после потери или неприятия  $N_m$  информационных блоков подряд, произойдёт рассинхронизация алгоритма перестройки рабочей частоты. Тогда алгоритм рабо-



а) Модули управления БПЛА



б) Виртуальная трасса полёта БПЛА

Рис. 4. Аппаратно-программный комплекс моделирования канала управления квадрокоптером

ты модуля запускает режим фиксированной частоты, выбирая указанные заранее параметры этого режима, модуль на стороне устройства управления (УУ) передаёт  $N$  информационных блоков (рис. 2), а модуль на стороне БПЛА делает тоже самое, по такому же алгоритму работы модуля и ждёт  $N$  информационных блоков от модуля УУ (рис. 3) [9].

Приём и передача информации о состоянии канала связи может осуществляться за короткое время с настройками, максимально повышающими помехоустойчивость. Определение качества канала связи можно осуществлять один раз в секунду или реже, причём качество канала связи в принципе можно описать с помощью всего трех состояний:

- необходимо повысить помехоустойчивость за счёт снижения скорости передачи информации и количества блоков информации в секунду;
- необходимо снизить помехоустойчивость и повысить число информационных блоков в секунду;
- качество канала связи не требует изменений его характеристик.

Следует отметить, что снижение скорости передачи информации приводит к затруднениям при управлении беспилотным аппаратом [10]. Для определения минимально возможного числа блоков информации в секунду и качества управления беспилотным аппаратом были разработаны и изготовлены приёмо-передающие модули управления БПЛА и создан программно-аппаратный комплекс, изображённый на рис. 4. [11].

Комплекс содержит два приёмо-передающих модуля, устройство управления БПЛА и имитатор полёта квадрокоптера. В настройках было выставлено, что в пакете передаётся 50 блоков в секунду. Проведённые экспериментальные исследования показали, что управление беспилотным аппаратом на радиоуправлении возможно даже при 7–8 блоках управляющей информации в секунду, но за счёт снижения точности управления квадрокоптером и, как следствие, скорости его полёта. Другими словами, при тяжёлой помеховой обстановке адаптивный канал управления беспилотными аппаратами позволит сохранить управление, но за счёт снижения скорости

Таблица 1. Числовые результаты проведённых испытаний.

Номер режима	Ширина полосы, кГц	Число изменений несущей частоты	Кодовая скорость внутреннего кода	Кодовая скорость внешнего кода	Длина преамбулы, байт	Число блоков информации в секунду	Чувствительность приёмника, дБм	Дальность, м
1	500	128	0,5	0,55	8	100	-116,5	132
2	250	128	0,5	0,55	10	50	-121,5	237
3	250	256	0,5	0,45	10	25	-124,0	313
4	125	128	0,5	0,26	11	15,15	-124,5	367
5	250	512	0,66	0,29	8	12,5	-126,5	421
6	250	1024	0,8	0,55	7	10,0	-129,0	642

аппарата. Кроме того, была исследована необходимая точность передаваемой информации. Так, в модулях системы экстра-большой дальности (ELRS — Express Long Range System) отводится 10 разрядов на каждую из степеней управления беспилотным аппаратом. Экспериментальные исследования показали, что достаточно 8 разрядов на каждый из каналов управления, что позволит снизить количество передаваемой информации на 1 байт и, как следствие, увеличить количество блоков в секунду или повысить помехоустойчивость за счёт использования освободившегося байта, как избыточности.

В таблице 1 приведены примеры различных режимов работы адаптивного канала управления и рассчитанная чувствительность приёмника, без учёта исправляющей способности помехоустойчивых кодов и длины преамбулы.

Алгоритм оценки качества канала, определяет отношение между количеством принятых блоков  $K$  из последних  $N$  переданных блоков:

$$Q = K / N.$$

Поскольку частота передачи блоков данных известна, то известно и количество переданных блоков  $N$  за единицу времени  $t_0$ . На приёмной стороне фиксируется, какое количество блоков данных было принято за последнее время  $t_0$ . Алгоритм оценки качества канала можно сделать более точным, если учитывать число принятых, но нераспознанных блоков, например, за счёт несовпадения контрольной суммы CRC, а также учитывать число исправленных ошибок помехоустойчивым кодом.

Величина кодирования и длина преамбулы принимались максимально возможными для заданного числа блоков в секунду в каждом конкретном режиме работы адаптивного канала управления. Для определения точного выигрыша по соотношению сигнал/шум, с учётом различных кодовых скоростей корректирующих кодов и длины преамбулы, необходимо проведение

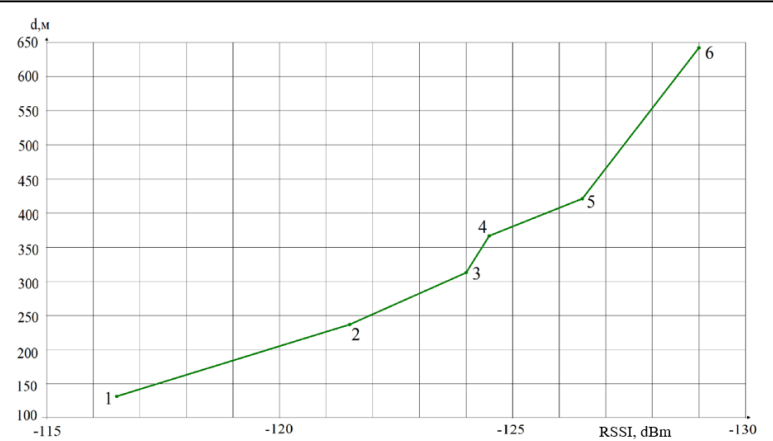


Рис. 5. Зависимость дальности связи от чувствительности приёмника

более масштабных модельных и натуральных экспериментальных исследований с использованием универсального кодека Рида-Соломона и аппаратно-программного комплекса, представляющего собой имитатор адаптивного канала управления беспилотным радиоуправляемым аппаратом.

При установленной мощности передатчика в 1 дБм, потеря связи (условие, когда более 90% блоков считаются утерянными) для разных режимов фиксировались на расстоянии  $d$ , представлено на рис. 5. На рисунке цифрами 1–6 показаны режимы в соответствии с таблицей 1.

### Заключение.

Предложен метод адаптивного управления БПЛА, основанный на изменении скорости передачи управляющей информации в зависимости от изменения помеховой обстановки в радиоканале управления. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволивший исследовать предложенный метод адаптивной перестройки параметров канала управления БПЛА в зависимости от качества радиоканала, оцениваемого по сигналам управления на стороне БПЛА. Проведённые эксперименты показали, что использование адаптивного канала управления способно на 3–5 дБ, а в экстремальной ситуации на 8 дБ, улучшить соотношение сигнал/шум, что даёт возможность продолжить управление беспилотным аппаратом

за счёт снижения скорости и точности его движения [12, 13].

#### Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. / Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
3. Альширайдех А.М., Самойлов А.Г. Верификация устройств помехоустойчивого кодирования // Проектирование и технология электронных средств. 2013. №1. С. 48–51.
4. Сидоренко А.А. Метод изменения избыточности последовательного каскадного кода, построенного на основе внешнего блочного кода // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. №2. С. 31–36.
5. Сидоренко А.А. Построение комбинированного кода на основе турбокода с дополнительным кодированием бит // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2024. № 1. С. 14–21.
6. Кульпин А.С., Полушин П.А., Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Адаптивный кодер для систем телеуправления магистральными газопроводами // Проектирование и технология электронных средств. 2005. №4. С. 59–63.
7. Даниленко А.М., Колесников Н.А., Конюх Е.С., Самойлов С.А. Адаптивный кодек Рида-Соломона для систем телеуправления и телеметрии // Труды междунаучно-техн. конф. «Перспективные технологии в

средствах передачи информации» (ПТСПИ-2017). Владимир-Суздаль, 2017. Т. 2. С. 191–193.

8. Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Адаптивное программирование в цифровых системах телеметрии // Проектирование и технология электронных средств. 2015. №4. С. 3–6.
9. Samoylov A.G., Samoylov V.S., Samoylov S.A. The use of adaptive matching circuits to adjust the impedance of high-frequency loads // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. 044096. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044096
10. Самойлов А.Г., Самойлов С.А., Самойлов В.С. Адаптивное согласование радиопередающих устройств с динамической нагрузкой // Проектирование и технология электронных средств. 2023. №3. С. 17–21.
11. Самойлов С.А., Даниленко А.М., Конюх Е.С. Кодек с исправлением ошибок для комплексов телеуправления и телеметрии // Материалы научно-техн. конф. «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2017). Рязань, 2017. Т. 3. С. 130–133.
12. Samoylov A.G., Samoylov S.A., Samoylov V.S., Galkin A.P. Adaptive encoding in remote digital telemetry and command systems // IOP Conference Series: Materials and Engineering. 2018. Vol. 450. 052005. DOI: 10.1088/1757-899X/450/5/052002.
13. Ростоккина Е.А., Арефьев Р.О., Ерохин В.В. Статистический анализ погрешностей определения координат беспилотного летательного аппарата по экспериментальным данным приёмников спутниковой навигации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025. №1. С. 13–24.

Поступила 5 ноября 2025 г.

English

## METHOD OF ADAPTIVE ADJUSTMENT OF THE PARAMETERS OF THE UAV CONTROL CHANNEL

**Vladislav Sergeevich Samoylov** — Assistant lecturer, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky Str., 87.

E-mail: [insertend175@gmail.com](mailto:insertend175@gmail.com)

**Abstract:** A method of adaptive motion control of radio-controlled unmanned aerial vehicles (UAVs) is proposed, aimed at increasing the stability and efficiency of the control channel in conditions of dynamically changing characteristics of the radio channel. The method is based on the implementation of algorithms for adaptive adjustment of communication channel parameters, including bandwidth, code rate of internal and external noise-resistant coding, length of the preamble, frequency of carrier hopping, as well as the number of transmitted information blocks per second. The parameters are adjusted in real time, depending on the current assessment of the channel quality performed on the UAV side in terms of the level of the received signal, the number of errors in the control commands, and the degree of correlation of the signal with the reference sequence. Receiving and transmitting control modules have been developed and manufactured that provide stable two-way communication at a range of up to 15 km in real radio space using LoRa receiving and transmitting technology and adaptive control algorithms. For the experimental study of the proposed algorithms, a hardware and software package has been created, including a quadcopter flight simulator with six degrees of freedom, control channel modeling software with the possibility of introducing additive and

pulse interference, as well as measuring equipment for analyzing signal parameters. As part of the experimental research, field and laboratory tests were conducted on virtual and real flight paths, during which various interference situations were simulated, including signal attenuation, multipath propagation, Doppler effects, and interference from other radio devices. It has been found that the use of an adaptive control channel improves the signal-to-noise ratio by 3-5 dB in normal conditions and up to 8 dB in extreme interference conditions, which ensures the UAV's controllability while reducing the transmission rate of control commands and increases flight range by compensating for losses in the communication channel.

*Keywords:* adaptation, communication system, controlled device, control channel, adaptive communication channels, LoRa technology.

#### References

1. *Sklar B.* Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed., corr. Moscow: Williams, 2003. 1104 p.
2. *Feher K.* Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications. Moscow: Radio i svyaz, 2000. 520 p.
3. *Alshraydeh A.M., Samoylov A.G.* Verification of Error-Correcting Coding Devices. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv.* 2013. No. 1. Pp. 48–51.
4. *Sidorenko A.A.* A Method for Changing the Redundancy of a Serial Concatenated Code Based on an External Block Code. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy.* 2024. No. 2. Pp. 31–36.
5. *Sidorenko A.A.* Construction of a Combined Code Based on a Turbo Code with Additional Bit Encoding. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli.* 2024. No. 1. Pp. 14–21.
6. *Kulpin A.S., Polushin P.A., Samoylov A.G., Samoylov S.A.* Adaptive Coder for Telecontrol Systems of Main Gas Pipelines. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv.* 2005. No. 4. Pp. 59–63.
7. *Danilenko A.M., Kolesnikov N.A., Konyukh E.S., Samoylov S.A.* Adaptive Reed-Solomon Codec for Telecontrol and Telemetry Systems. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Advanced Technologies in Information Transmission" (PTSPI-2017).* Vladimir-Suzdal, 2017. Vol. 2. Pp. 191–193.
8. *Samoylov A.G., Samoylov S.A.* Adaptive Programming in Digital Telemetry Systems. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv.* 2015. No. 4. Pp. 3–6.
9. *Samoylov A.G., Samoylov V.S., Samoylov S.A.* The use of adaptive matching circuits to adjust the impedance of high-frequency loads. *Journal of Physics: Conference Series.* 2019. Vol. 1399. 044096. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044096.
10. *Samoylov A.G., Samoylov S.A., Samoylov V.S.* Adaptive Matching of Radio Transmitting Devices with Dynamic Load. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv.* 2023. No. 3. Pp. 17–21.
11. *Samoylov S.A., Danilenko A.M., Konyukh E.S.* Error-Correcting Codec for Telecontrol and Telemetry Systems. *Materials of the Scientific and Technical Conference "Modern Technologies in Science and Education" (STNO-2017).* Ryazan, 2017. Vol. 3. Pp. 130–133.
12. *Samoylov A.G., Samoylov S.A., Samoylov V.S., Galkin A.P.* Adaptive encoding in remote digital telemetry and command systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2018. Vol. 450. 052005. DOI: 10.1088/1757-899X/450/5/052002.
13. *Rostokina E.A., Arefyev R.O., Erokhin V.V.* Statistical analysis of errors in determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle based on experimental data from satellite navigation receivers. *Radioengineering and telecommunication systems.* 2025. No. 1. Pp. 13–24.