

УДК 621.398

## СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ МОНИТОРИНГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ С ВИНТА ВЕРТОЛЁТА

В. М. Викулов<sup>1</sup>, А. А. Парамонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО НИЦ «ИРТ», Москва 119049

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454

Статья поступила в редакцию 22 октября 2019 г.

**Аннотация.** В работе предложено использовать радиоканал для передачи мониторинговой информации с движущихся элементов колонки несущего винта вертолёт. Использование беспроводного канала позволяет оснащать системами диагностики действующие вертолёт без существенных изменений в конструкции. Выполнен подбор частотного диапазона для реализации беспроводного канала, основанный на фактических данных радиочастотной загрузки связных систем современных вертолёт. Проведено моделирование и создание макетного образца антенны, входящей в приёмопередающий тракт. Проведена техническая оценка радиоканала и представлены данные стендового эксперимента.

**Ключевые слова:** радиоканал, IEEE 802.11, система диагностики, антенна, вертолёт.

**Abstract.** It is proposed to use a radio channel for transmitting monitoring information from moving elements of a rotor column of a helicopter. Using a wireless channel allows you to equip existing helicopters with diagnostic systems without significant changes in design. The selection of the frequency range for the implementation of the wireless channel is performed, based on the actual data of the radio frequency loading of the communication systems of modern helicopters. Simulation and creation of a prototype antenna model included in the transceiver path are carried out. A technical assessment of the radio channel was carried out and data from a bench experiment were presented.

**Key words:** radio channel, IEEE 802.11, diagnostic system, antenna, helicopter.

## Введение

За последние три десятка лет произошло массовое внедрение новых материалов в авиационную технику: металлы и сплавы в фюзеляжах и корпусах машин почти полностью заменяются композитными материалами (КМ), ничем не уступающими в прочностных характеристиках, но дающими огромный выигрыш по массогабаритным параметрам.

Однако единой методики контроля повреждений элементов конструкций из КМ, широко применяемых в современной военной технике, до сих пор нет. Вероятность же разрушения таких конструкций, несмотря на осуществление периодического стационарного осмотра, во многом зависит от качества исходных материалов и технологии изготовления изделия. Особенно высока непредсказуемость поведения композитных агрегатов, узлов и конструкций, доля которых в составе образцов военной техники с каждым годом увеличивается, при многоцикловой усталости.

Например, современные методы контроля вертолётной техники в РФ регламентируют лишь периодический осмотр деталей, а их замена или починка определяется фиксированным сроком налёта. Такой вариант себя зарекомендовал на образцах вертолётов, которые уже не один десяток лет находятся в эксплуатации, претерпевая лишь небольшие изменения в конструкции, так как на большой выборке произведённых единиц и при детальном разборе каждой поломки или аварии можно установить сроки и объём регламентных ремонтных работ по каждому узлу вертолёта.

Однако для новых вертолётов такой подход к обеспечению живучести конструкций по налёту не подходит из-за отсутствия достаточной статистики по каждому агрегату. Для них представляется особенно важным отслеживание состояния принципиальных узлов лётной техники непосредственно в процессе эксплуатации, что позволит делать выводы об износе той или иной детали по фактическому её состоянию. Такой мониторинг состояния важнейших узлов вертолёта окажется очень полезным и для аппаратов, давно находящихся в эксплуатации.

Таким образом, потребность в новых методах и системах контроля технического состояния конструкций лётной техники в авиации в режиме реального времени очень велика, что влечёт за собой необходимость решения большого набора научных и технических задач. В качестве примера системы, контролирующей состояние конструкции вертолёт в реальном времени, можно привести систему HUMS производства США [1].

Основная сложность разработки подобной универсальной (т.е. пригодной для использования на разных типах вертолёт) системы мониторинга определяется тем фактом, что большое количество технически важных узлов располагается на вращающейся части воздушного судна – колонке несущего винта (НВ). Пристального внимания требуют такие детали, как ползуны, автоматы перекоса, тяги управления, лопасти и т.д. [2].

Исходя из того, что регистрирующие блоки размещены на колонке НВ, встаёт вопрос о передаче информации с них в накопитель, находящийся внутри фюзеляжа вертолёт. Есть два принципиальных подхода:

1. Передача информации по каналам токосъёмника. В идеальном варианте это было бы хорошим решением, но так как стоит задача оснастить системой не только разрабатываемые, но и уже существующие виды вертолёт, приходится принять тот факт, что все сигнальные шпильки токосъёмника уже заняты штатными системами, такими как система отстрела лопастей, система их обогрева и т.д.

2. Создание локального радиоканала в рамках вертолёт для передачи информации винта (винтов) вертолёт в режиме реального времени. Данное решение отлично подходит для вертолёт, так как снимается вопрос адаптации системы под каждый тип вертолёт в части передачи информации.

Ниже описан принцип и некоторые технические решения, принятые при создании радиоканала для передачи данных с колонки НВ в регистратор данных, находящийся внутри фюзеляжа вертолёт. Разработка системы мониторинга велась для вертолёт марки «Камов», имеющих классическую соосную схему колонки НВ.

## 1. Размещение систем на вертолётe

Одна из важнейших задач, решаемых системой мониторинга – контроль системы продольно-поперечного управления и контроль деформаций лопастей НВ. Блоки контроля деформации лопастей вертолётa размещаются на колонке НВ, как схематично показано на рисунке 1.

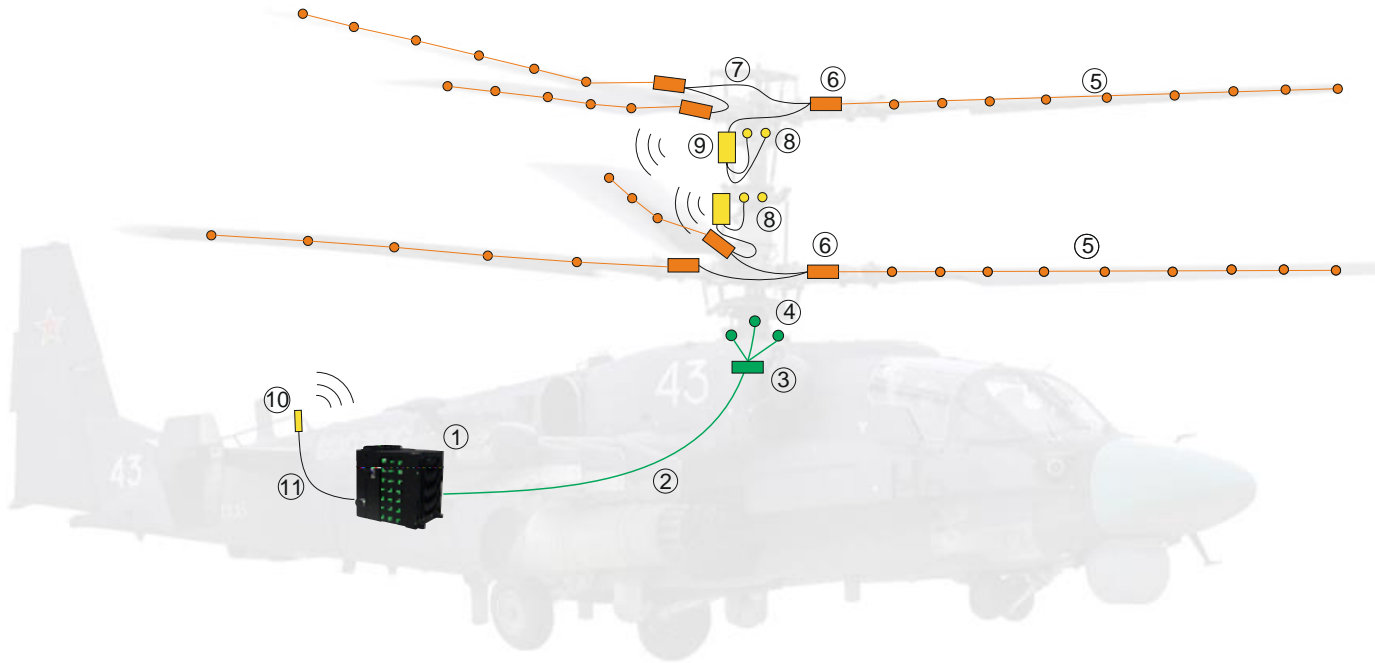


Рис. 1. Размещение системы мониторинга на вертолётe.

Описание схемы:

- бортовой блок регистрации данных – 1;
- волоконно-оптические кабели связи – 2;
- волоконно-оптические тензодатчики, установленные на невращающихся элементах системы продольно-поперечного управления – 4;
- волоконно-оптические тензодатчики, встроенные и/или установленные на поверхности лопастей несущего винта вертолётa – 5;
- блоки регистрации данных о деформации, установленные на лопастях винта – 6;
- электрические кабели связи – 7;
- волоконно-оптические тензодатчики, установленные на вращающихся элементах колонки вертолётa – 8;
- блок сбора и передачи данных по радиоканалу – 9;
- антенна приёмная – 10;
- высокочастотный кабель – 11.

Функциональная схема организации сбора и передачи данных на одном винте вертолѐта приведена на рисунке 2.

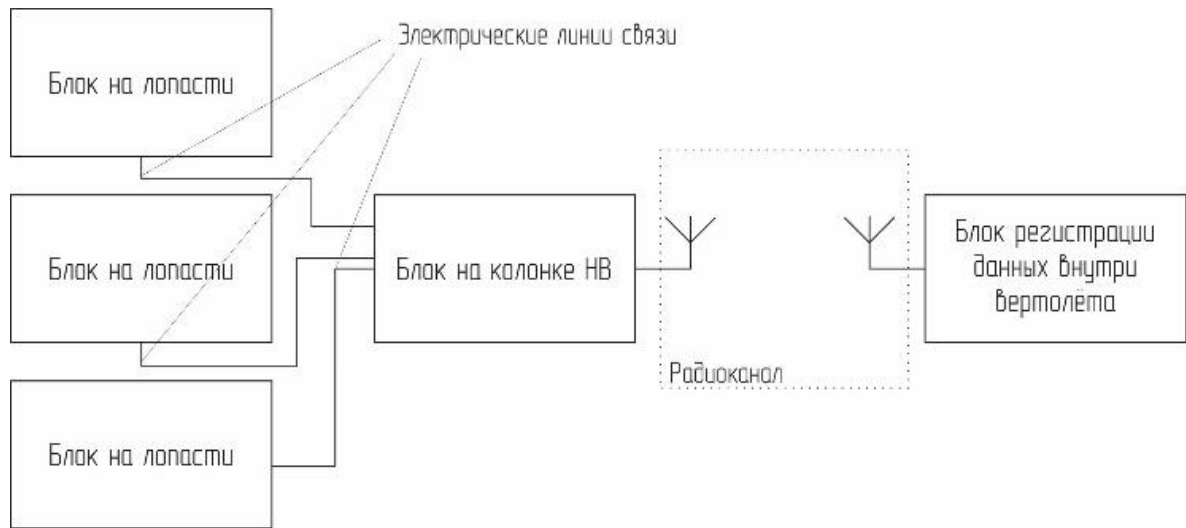


Рис. 2. Функциональная схема системы сбора и передачи информации.

Лопастные блоки располагаются на комлевой части и связываются с блоком на колонке по электрическому каналу.

Блок на колонке НВ имеет в своём корпусе приёмопередатчик и миниатюрную антенну.

Вся информация собирается в оконечном блоке и передаётся по радиоканалу на блок регистрации внутри фюзеляжа вертолѐта.

## 2. Требования к радиоканалу

При выборе рабочей частоты для радиоканала необходимо учитывать два обстоятельства:

1. Существенная загруженность радиодиапазонов аппаратурой, установленной на вертолѐте.
2. Вынужденная миниатюрность антенн.

Для подбора нужного частотного диапазона была проведена оценка номенклатуры радиосредств вертолѐтной техники в РФ. Не останавливаясь подробно на анализе использования радиочастотного диапазона всеми радиосредствами вертолѐта, отметим, что наиболее подходящим для рассматриваемой в статье системы мониторинга представляется частный диапазон 2...2,5 ГГц.

Данный частотный диапазон отлично решает и вторую проблему, так как в условиях миниатюрности антенн более высокочастотные диапазоны предпочтительнее, так как апертура антенны напрямую связана с эффективной резонансной частотой.

Исследование стандартных интерфейсов позволило остановиться на стандарте IEEE 802.11, широко используемом повсеместно и имеющем подходящие характеристики по пропускной способности.

Отдельно стоит отметить, что номенклатура модулей приёмопередачи стандарта очень широка, и, что немаловажно, есть исполнения с повышенной стойкостью к внешним воздействующим факторам, таким как температура, вибрация, удар и т.д.

### **3. Размещение антенн на борту вертолѐта**

Отдельным важным вопросом при проработке радиоканала была проблема неравномерного распространения сигнала с колонки НВ из-за частоты вращения самой колонки, а, следовательно, и блоков. Частота вращения находится в окрестностях 5 Гц и может меняться в ходе полѐта.

Построение радиоканала НВ-корпус вертолѐта наталкивается на ряд трудностей, из которых к числу основных можно отнести излучение антенны, установленной на колонке НВ, в направлении, противоположном направлению на приёмную антенну на некоторых временных интервалах, перекрытие нижним винтом линии прямой видимости и появление дополнительных лучей, вызванных отражениями от элементов вертолѐта.

Для борьбы с перерывами связи, вызванными вращением НВ и обусловленными тем, что в течение некоторой части периода вращения НВ передающая антенна направлена в противоположную от приёмной антенны сторону, было рассмотрено два подхода:

1. Программно реализовать синхронизацию сеансов передачи с вращением винта, то есть принимать пакетные сообщения только в моменты, когда блок на колонке винта находится в зоне радиовидимости антенны на фюзеляже. Это было бы возможно при условии получения точных данных о

частоте вращения в режиме реального времени для постоянной корректировки времени между сеансами связи. Так как такую информацию получить напрямую не представляется возможным, было принято решение отказаться от такой идеи.

2. Воспользоваться методом пространственного разнесения в приёмной части, т.е. установки нескольких антенн на расстоянии друг от друга с последующей обработкой принятых ими сообщений с отсевом повторных в программной среде обработки.

Основная рекомендация при установке приёмных антенн – пространственное разнесение по фюзеляжу вертолётa, например, на пилонах или на концах стабилизаторов (рис. 3).

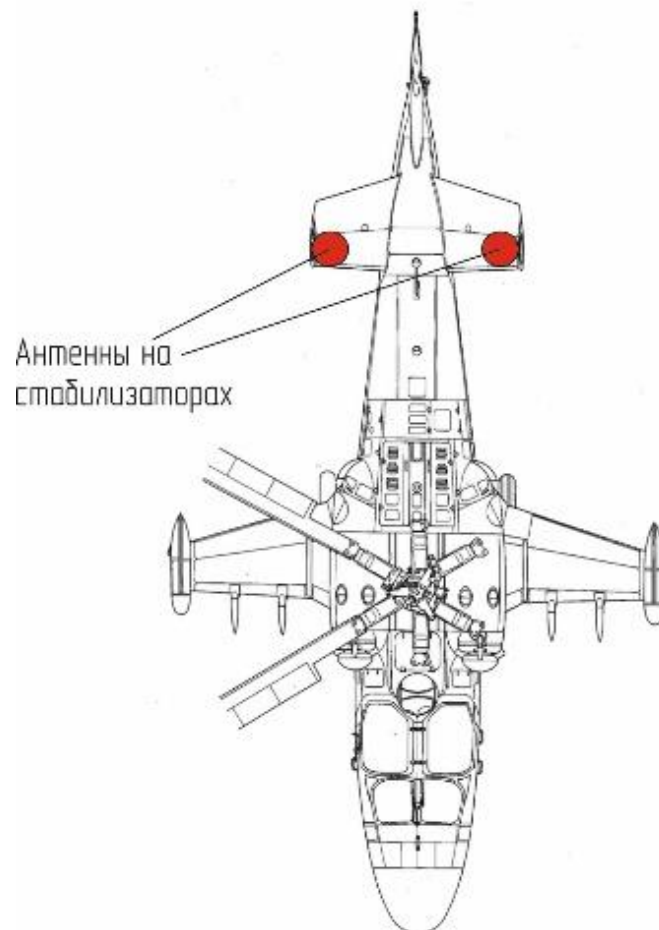


Рис. 3. Предлагаемое размещение антенн на фюзеляже.

Помимо борьбы с интерференцией такое пространственное разнесение позволяет нивелировать негативный эффект радиотени, вызванной

перекрытием линии прямой видимости лопастями нижнего винта, что при условии использования одной антенны создавало бы паузы при передаче в моменты перекрытия.

#### 4. Оценка пропускной способности и подбор антенны

Основные ограничения на радиоканал накладывает условие установки приёмной антенны на фюзеляже вертолѐта и количество информации, требуемой для передачи.

Требования по количеству информации, поступающего от каждого датчика, предъявляются исходя из потребности получения ежесекундно достаточного для целей мониторинга объема информации. В настоящее время считается, что достаточна частота опроса  $F_{\text{опр}} = 500$  Гц.

В соответствии с количеством блоков (4 на винт) и количеством опрашиваемых датчиков каждым блоком (не более 16) общее количество каналов поступления информации для передачи  $n_{\text{кан}}=64$ .

Информацию допускается представить 16-разрядным числом. Это объясняется физическими принципами преобразования оптического сигнала в электрический и необходимой точностью этого преобразования и не является предметом изучения настоящей работы.

Исходя из сказанного, несложно подсчитать минимально необходимую скорость передачи информации по радиоканалу:

$$V = F_{\text{опр}} \times n_{\text{кан}} \times 16 = 512\,000 \text{ бит/с} \approx 0,5 \text{ Мбит/с}$$

Стандарт IEEE 802.11 поддерживает пакетный обмен данными, в связи с чем, добавляется избыточность для поддержки подлинности пакетов и сервисных команд. Приняв, что для реализации требуемой избыточности скорость передачи должна быть увеличена вдвое по сравнению с только что оцененной, следует принять, что радиоканал должен обеспечить скорость передачи информации с одного винта 1 Мбит/с. Наконец, одновременная передача информации с двух НВ потребует от радиоканала скорости передачи 2 Мбит/с.



При разработке антенного тракта на фюзеляже вертолѐта нужно было учесть следующие ограничения:

- Компактность габаритов антенны.
- Обтекаемая конфигурация при всепогодном исполнении с повышенной стойкостью к внешним воздействующим факторам.
- Постоянно меняющиеся уровни сигнала из-за кручения винта вертолѐта.

В качестве антенны было принято решение остановиться на варианте штыревой антенны, габаритный чертѐж и внешний вид которой приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведена диаграмма направленности (ДН) этой антенны. Теоретический расчѐт и компьютерное моделирование антенны показали, что на частоте резонанса она имеет ДН в форме тора, что максимально близко к варианту изотропного излучателя. Моделирование показало коэффициент стоячей волны (КСВ) на частоте резонанса – 1,7, что является отличным показателем для подобного типа антенн [3, 4, 5].

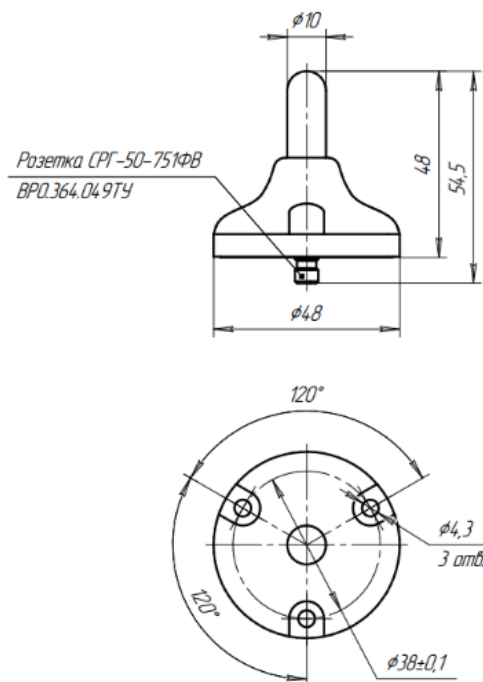


Рис. 4. Приѐмо-передающая антенна.

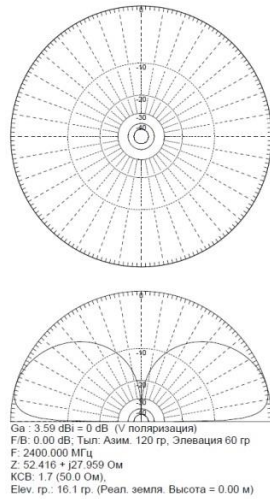


Рис. 5. ДН антенны.

Для подтверждения возможности использования рассчитанной антенны в системе были изготовлены два опытных образца и протестированы в безэховой камере.

Исследовались две конструктивно идентичные штыревые антенны, предназначенные для монтажа на поверхности. Предполагаемая центральная частота рабочего диапазона – 2,45 ГГц.

Требовалось получить экспериментальную оценку степени согласования антенн по отношению к 50-омному тракту и их коэффициента усиления.



Рис. 6. Антенны на листе металла в процессе измерений.

Измерения производились в безэховой камере с помощью анализатора цепей Rohde&Schwarz ZWB20 при установке антенн на листе металла, как показано на рис. 6.

Входные характеристики антенн оказались практически идентичны в полосе 1,5 – 2 ГГц и несколько различаются на более высоких частотах (рис. 7).

Наилучшее согласование (значения КСВ (SWR) 1,5 – 1,6) достигается в полосе 1,8 – 2,2 ГГц;

На частоте 2,45 ГГц значения КСВ близки к 2 (соответствует 10% отражённой мощности).

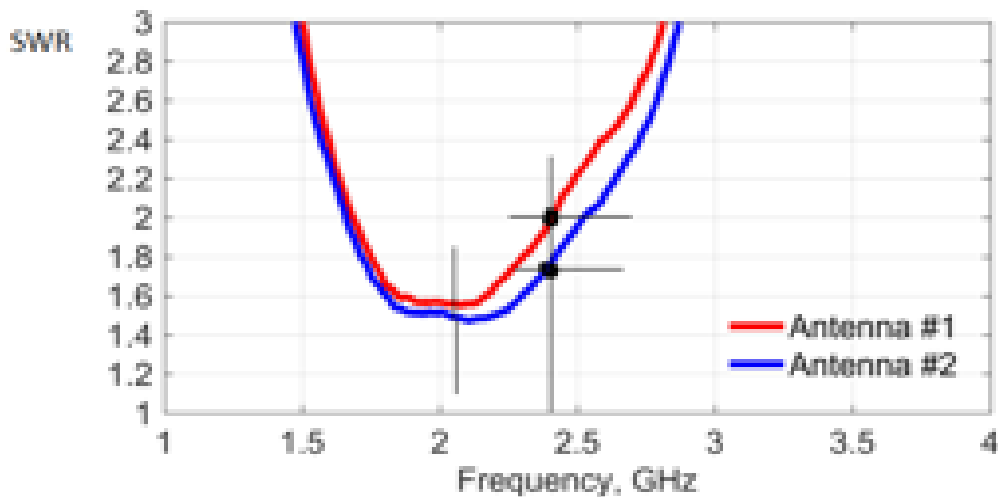


Рис. 7. Антенны на листе металла в процессе измерений.

Коэффициент усиления исследованной штыревой антенны в экваториальной плоскости на частотах наилучшего согласования был определён в эксперименте как 1,7 (2,3 дБ)

Представляется, что достижение лучшего согласования (по крайней мере, до значений КСВ = 1,2) на частоте 2,45 ГГц при полосе  $\pm 100$  МГц является вполне разрешимой задачей при лучшем подходе к согласованию антенны с проводной линией.

## 5. Стендовый эксперимент

Для подтверждения работоспособности предложенных выше решений был проведён стендовый эксперимент по организации радиоканала с

применением антенны, планируемой для установки на фюзеляж.

Данные формировались на FPGA, передавались на ESP32 (интерфейсная микросхема протокола IEEE 802.11 [6]), паковались и отправлялись по Wi-Fi (рис. 8).

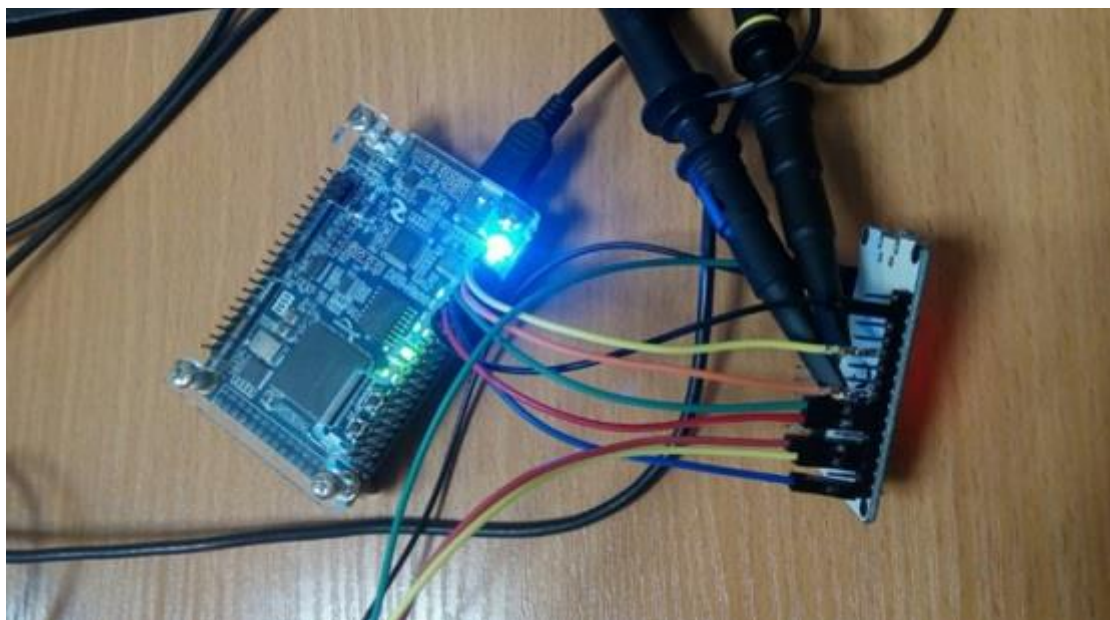


Рис. 8. Передающая часть системы мониторинга.

Приёмником выступала плата от производителя Mikrotik. (рис. 9).

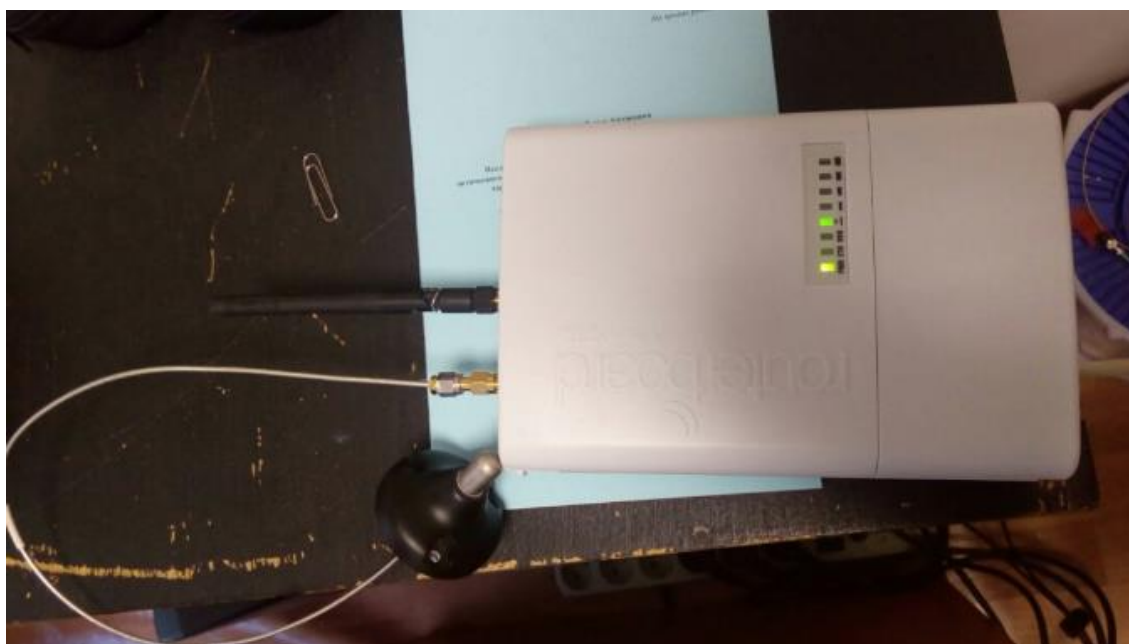


Рис. 9. Приёмная часть с антенной.

Результаты приведены на рис. 10.

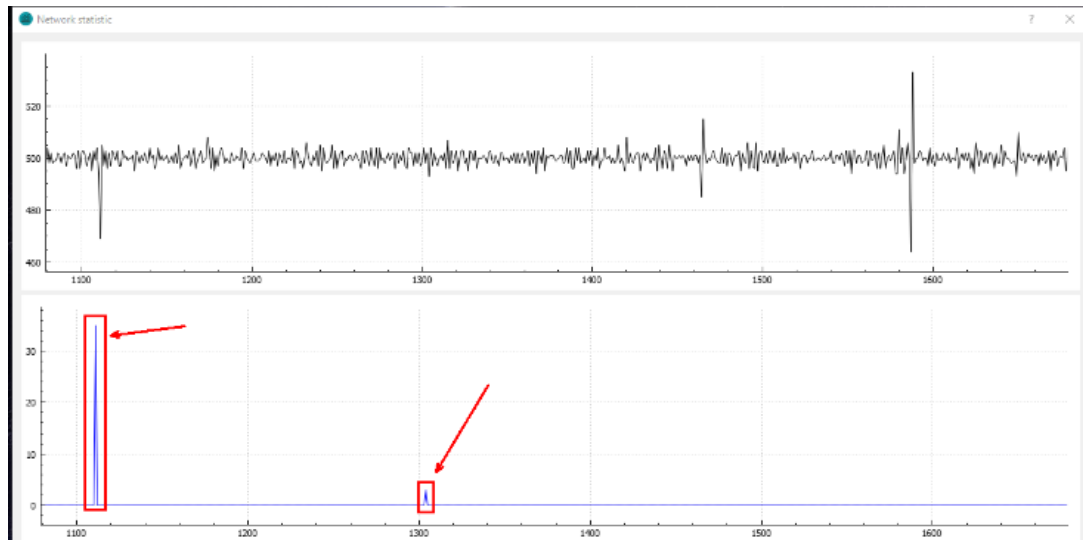


Рис. 10. Результаты экспериментов.

График пропускной способности – верхний график на рис. 10. Её среднее значение составляет 2.2Мбит/с, что полностью перекрывает расчётные требования.

На нижнем графике приведены места появления потерянных пакетов (отмечены красным). С учётом того, что график отображает 10 минут работы радиоканала, 2 потерянных пакета являются допустимыми потерями.

## 6. Заключение

В статье показана техническая возможность создания системы мониторинга состояния НВ с передачей информации в приемную аппаратуру, располагаемую внутри фюзеляжа вертолёта, по радиоканалу.

Необходимая скорость передачи информации в системе мониторинга не превышает 2 Мбит/с.

Целесообразно для передачи информации использовать частоты в диапазоне 2,0...2,5 ГГц.

Для пакетной передачи данных в системе удобным является использование стандарта IEEE 802.11.

В качестве приемо-передающих антенн предложено использовать компактные штыревые антенны.

Правильность предложенных решений подтверждена стендовым экспериментом.

## Литература

1. Boller C., Fujino Y. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd., - 2009.
2. Lvov N.L., Khabarov S.S., Gavrikov M.Yu. Creation of an integrated system for monitoring the technical condition of high-quality helicopter units based on fiber-optic technology. *International Journal of Engineering & Technology*. Science Publishing Corporation Inc. 2018. Vol. 7, No. 4.38. P. 1162-1166.
3. Balanis C. A. *Modern antenna handbook*. John Wiley & Sons, Inc., 2008. 1704 p.
4. Milligan T. A. *Modern antenna design*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
5. Bahl I. I., Bhartia P., Garg R. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Morwood: Artech House, Inc. 2000. 845 p.
6. Рошан П., Лиэри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Руководство Cisco - 802.11 Wireless Local-Area Network Fundamentals. М.: «Вильямс», 2004. С. 304. ISBN 5-8459-0701-2.

### Для цитирования:

В. М. Викулов, А. А. Парамонов. Система передачи мониторинговой информации с винта вертолётa. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/9/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.9