

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Институт радиотехники, электроники и связи
Специальность 25.05.03
«Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Пояснительная записка

Тема:

РАДАРНЫЙ ДАТЧИК ПРИСУТСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ КВАДРАТУРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ПРИЁМНИКА 24 ГГц

Проектирование и сквозная исполняемая верификация

Выполнил: Дьяков Герман Юрьевич

Санкт-Петербург

2026

Реферат

Записка: ~58 с., 3 части, 23 таблицы, 6 рисунков, 29 источников, 1 приложение (репозиторий с исходным кодом, схемой и 93 автоматическими тестами).

КВАДРАТУРНЫЙ ПРИЁМ, ДОПЛЕРОВСКИЙ РАДАР, ДАТЧИК ПРИСУТСТВИЯ, ДЫХАНИЕ, СВЧ 24 ГГц, АНАЛОГОВЫЙ ТРАКТ, ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЯ, STM32, ИСПОЛНЯЕМАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ, ДАТЧИК ЗАНЯТОСТИ

Объект работы — датчик занятости помещения, призванный удерживать состояние «занято» по дыханию неподвижного человека. Цель — спроектировать изделие на уровне расчётного проекта (design-stage, без изготовления) и проверить расчётом и моделированием, доведя каждый результат до исполняемой, воспроизводимой читателем формы.

Спроектирован двухканальный аналоговый тракт (усиление 200, полоса 0,048–482 Гц), снимающий 476-кратное паспортное смещение смесителя до усиления с сохранением полосы дыхания; тракт проверен схемотехническим моделированием (расхождение с расчётом < 2%). Отдельно отмечено ограничение: в полосе дыхания шум определяется тепловым шумом резистора смещения 10 МОм, а не модуля. Обоснован выбор STM32F411: одного АЦП достаточно (перекос выборок стоит около 0,17 дБ подавления зеркального канала в худшем случае), а передискретизация 20 кГц устраняет деградацию 3,8 дБ от шума квантования (для идеального АЦП). Принципиальная схема порождается из проверенной топологии; тождественность подтверждена обратной выгрузкой цепей. Алгоритмы обработки (децимация 60,5 дБ, знаковый доплер по набегу фазы без спектрального анализа, банк Гёрцеля, дискриминатор «возврата на место» 0,25 м) реализованы на переносимом Си и проверены исполнением на сценариях физической модели. Между физической моделью и прошивкой построена единая модель тракта и АЦП (смещение, шумы, разбаланс I/Q,

насыщение, квантование), на которой методом Монте-Карло получены вероятности обнаружения и ложной тревоги; результат честно показывает, что уверенное обнаружение дыхания ограничено 1–3 м. Экономический расчёт дан как сценарная оценка потенциальной экономии; показано соответствие частотным нормам (ЭИИМ втрое ниже лимита) и санитарным нормам при рабочем расстоянии не менее 0,2 м. Характеристики, требующие измерений (дальность, вероятности обнаружения и ложных тревог, окупаемость), отнесены к этапу изготовления.

Работа наследует тему ВКР автора 2020 года; две ошибки той работы разобраны и определили методику настоящей: сквозную исполняемую верификацию, обнаруживающую ошибки согласованности расчётных проектов.

Содержание

Введение.....	4
1.1 Обзор методов обнаружения присутствия человека.....	7
1.2 Доплеровский принцип и квадратурный приём.....	12
1.3 Энергетика радиолинии.....	15
1.4 Разбор работы 2020 года.....	18
2.1 Аналоговый тракт.....	22
2.2 Верификация аналоговой части.....	30
2.3 Оцифровка и выбор микроконтроллера.....	34
2.4 Схема электрическая.....	39
2.5 Программа обработки сигналов.....	42
2.6 Единая модель тракта и статистический анализ.....	49
3.1 Экономическое обоснование.....	53
3.2 Безопасность.....	57
Заключение.....	61
Список использованных источников.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	67

Введение

Актуальность. Автоматическое управление освещением — простейшая и самая массовая мера энергосбережения в зданиях, и почти всюду она опирается на пироэлектрические ИК-датчики (PIR). PIR регистрирует только изменение тепловой картины: человек, работающий за столом без движения, для него неотличим от пустой комнаты. Практика сводится к дилемме таймаута: короткая выдержка (1–2 мин) гасит свет на неподвижных людях, после чего пользователи отключают автоматику; длинная (20–30 мин) оставляет свет гореть впустую бóльшую часть эпизодов отсутствия. Оба исхода съедают экономию, ради которой датчик устанавливался. Дилемма снимается, если датчик способен видеть неподвижного человека; физический признак, доступный для этого на дальностях помещения, — периодическое смещение грудной клетки при дыхании (4–12 мм), различимое доплеровским радаром 24 ГГц ($\lambda = 12,4$ мм) по фазе отражённого сигнала.

Связь с предшествующей работой. Работа наследует тему выпускной квалификационной работы автора (ГУАП, 2020) о СВЧ-датчиках движения. Пересмотр той работы выявил две ошибки, ломающие конструкцию (несущая 120 МГц; определение направления на одноканальном приёмнике); их разбор (гл. 1.4) послужил отправной точкой и определил как технические решения, так и методику настоящей работы.

Цель работы — спроектировать на уровне расчётного проекта (design-stage, без изготовления) и проверить расчётом и моделированием датчик занятости помещения на квадратурном доплеровском приёмнике 24 ГГц, удерживающий состояние «занято» по дыханию неподвижного человека и различающий направление движения.

Задачи работы:

1. Обзор методов обнаружения присутствия и обоснование выбора архитектуры (гл. 1.1).

2. Физическая модель квадратурного приёма; исполняемое доказательство

неспособности одноканального приёмника различать направление (гл. 1.2).

3. Энергетический расчёт радиолинии по паспорту серийного модуля; выявление действительных ограничений конструкции (гл. 1.3).

4. Разбор ошибок работы 2020 года с выводом требований (гл. 1.4).

5. Аналоговый тракт: архитектура, подавляющая 476-кратное смещение без

потери полосы дыхания; верификация схемотехническим моделированием (гл. 2.1–2.2).

6. Обоснование оцифровки: достаточность одного АЦП и 12 разрядов, выбор микроконтроллера (гл. 2.3).

7. Принципиальная схема, порождаемая из верифицированной топологии,

с машинной проверкой соответствия (гл. 2.4).

8. Алгоритмы обработки: децимация, знаковый доплер, дискриминатор «возврата на место», детекция дыхания; верификация прошивки на сценариях физической модели (гл. 2.5).

9. Экономическое обоснование и анализ безопасности (гл. 3.1–3.2).

Метод работы следует из уроков гл. 1.4: каждый результат существует в исполняемой форме и пересчитывается автоматически. Паспортные данные собраны в единую программную структуру; расчёты выполнены кодом и закреплены 93 автоматическими тестами; аналоговый тракт дополнительно проверен независимым схемотехническим моделированием; схема генерируется из проверенной топологии и сверяется обратной выгрузкой цепей; между физической моделью и прошивкой встроена единая модель аналогового тракта и АЦП (смещение, шумы, разбаланс I/Q, насыщение, квантование), позволяющая и прогон алгоритмов, и статистический анализ Монте-Карло (гл. 2.6). Важная оговорка о границе метода: и эта модель

остаётся моделью, а не измерением. Тесты подтверждают внутреннюю согласованность расчётов и работу алгоритмов на модельных сигналах, но не заменяют записи реального сигнала с модуля. Поэтому работа не претендует на подтверждение работоспособности изделия; её результат — воспроизводимый расчётный проект с явно выявленными рисками.

На защиту выносятся главные проверяемые положения:

1. Архитектура тракта со срезом 0,048 Гц как компромисс, одновременно

снимающий 476-кратное смещение и сохраняющий полосу дыхания; цена решения — 16 с установления и повышенный шум резистора смещения в полосе дыхания.

2. Обоснование выбора STM32F411: одного АЦП для квадратурного приёма при

паспортной квадратуре $\pm 10^\circ$ достаточно (перекос выборок стоит около 0,17 дБ подавления зеркального канала в худшем случае).

3. Необходимость передискретизации: при 2 кГц шум квантования 12 разрядов

превышает шум аналогового тракта (деградация 3,8 дБ для идеального АЦП); 20 кГц с децимацией снижает её до 0,57 дБ и снимает нужду во втором порядке антиалиасингового фильтра.

4. Реализация дискриминатора «возврата на место» на накопленном набеге

фазы — без спектрального анализа и его памяти; направление даётся знаком набеге.

5. Методика сквозной исполняемой верификации, обнаруживающая ошибки

согласованности, характерные для расчётных работ, — и её границы.

Границы работы. Макет не изготавливался; заявленное проверено расчётом, моделированием и исполнением на модельных сценариях, и границы каждой проверки указаны явно. Характеристики, требующие

измерений (дальность, вероятности обнаружения и ложных тревог, шум в полосе дыхания, окупаемость, санитарный запас у антенны), не заявляются подтверждёнными и отнесены к этапу железа вместе с захватом АЦП и калибровкой порогов.

Записка состоит из трёх частей (постановка и физика; конструкция; реализуемость), заключения и списка из 29 источников.

1.1 Обзор методов обнаружения присутствия человека

1.1.1 Задача и критерий обзора

Обнаружением *присутствия* далее называется способность удерживать состояние «в помещении есть человек», включая человека неподвижного — сидящего, читающего, спящего. Этим задача отличается от обнаружения

движения, которой достаточно для охранной сигнализации, но не для управления освещением: именно на неподвижных людях автоматика освещения даёт ложные отключения (введение). Методы ниже оцениваются по одному главному критерию — какой физический признак *неподвижного* человека доступен методу — и по сопутствующим: дальность, стоимость, приватность, характерные отказы.

1.1.2 Пассивные методы

Пассивные методы не излучают, а регистрируют то, что человек создаёт сам.

Пироэлектрический ИК-датчик (PIR). Пироэлектрик вырабатывает заряд при

изменении температуры чувствительного элемента; многосегментная линза Френеля разбивает поле зрения на чередующиеся зоны, и движущийся тепловой объект создаёт переменный сигнал. Слепота к неподвижному человеку — не дефект исполнения, а строение метода: постоянный тепловой

поток даёт на выходе пироэлектрика нуль независимо от качества элемента. Отсюда дилемма таймаута (введение): короткий гасит свет на сидящих, длинный съедает экономию. При этом PIR в своей нише вне конкуренции по цене (300–700 Р), потреблению (микроамперы) и простоте — поэтому целесообразна не замена PIR всюду, а дополнение его там, где слепота к неподвижности критична.

Видеоаналитика. Камера с алгоритмом детекции людей решает задачу присутствия в полном объёме и даёт сверх неё счёт и локализацию. Цена решения — вычислитель, и главное — приватность: в помещении появляется устройство, формирующее изображения, со всеми режимными и правовыми следствиями (обработка биометрии и персональных данных). Для жилых, медицинских, гостиничных помещений это часто неприемлемо в принципе, независимо от заверений об «обработке на борту».

Датчики среды (CO₂, шум). Рост концентрации CO₂ надёжно свидетельствует о людях, но постоянная времени — десятки минут, и сигнал разрушается вентиляцией; акустика не видит тихого человека и страдает от ложных срабатываний. Оба признака пригодны как вспомогательные в мультисенсорных системах, но не как основа управления светом.

1.1.3 Активные методы

Активные методы освещают помещение собственным полем и извлекают признак человека из отклика.

Ультразвуковой доплеровский. Излучение 25–40 кГц, приём доплеровского сдвига от движения. Достоинство — дешёвый преобразователь; недостатки физические: скорость звука на пять порядков ниже скорости света, поэтому воздушные потоки (вентиляция, конвекция от отопления) создают собственные доплеровские сдвиги; ткань одежды сильно поглощает ультразвук; частоты слышны домашним животным. Съём дыхания ультразвуком в воздухе на метрах дальности практически не демонстрируется.

Ёмкостные. Изменение ёмкости электродной системы телом человека. Дальность — сантиметры или десятки сантиметров у крупных электродов; метод уместен во встраиваемых применениях (мебель, кровать, руль), но не для помещения в целом.

Обнаружение по каналу Wi-Fi (CSI, IEEE 802.11bf [27]). Человек искажает многолучевую картину распространения существующих Wi-Fi-сигналов; стандарт 802.11bf оформляет извлечение этих искажений. Направление активно развивается и привлекательно отсутствием отдельного датчика, но на 2026 год остаётся зависимым от чужой инфраструктуры (топологии сети, трафика, прошивок точек доступа) и не даёт гарантированных характеристик обнаружения; для автономного прибора управления светом основа ненадёжна.

СВЧ-радар непрерывного излучения (CW-доплер). Приёмопередатчик освещает помещение немодулированной несущей; движение цели даёт доплеровский сдвиг, а периодическое смещение грудной клетки при дыхании (4–12 мм) — фазовую модуляцию отражённого сигнала, различимую на длине волны 12,4 мм (гл. 1.2, [9]). Это и есть искомый физический признак неподвижного человека. Радиоволна проходит одежду и лёгкие перегородки, не зависит от освещённости и воздушных потоков, не формирует изображений. Ограничения: нет информации о дальности (все отражатели свёрнуты в один сигнал), подвижные предметы (листва, шторы, вентилятор) требуют алгоритмической отбраковки (гл. 2.5).

СВЧ-радар с модуляцией (FMCW). Модуляция частоты добавляет измерение дальности: пространство делится на стробы, помеховые отражатели отбраковываются по месту, доступны многоцелевые режимы. Это архитектурно более сильное решение — современные однокристалльные FMCW-датчики 60–77 ГГц [28] и массовые модули 24 ГГц (HLK-LD2410, гл. 3.1) демонстрируют его зрелость. Цена — кратно более сложные СВЧ-тракт (линейность перестройки) и обработка; тракт массовых модулей закрыт: наружу выдаётся готовый вердикт без доступа к сигналу.

1.1.4 Сравнение

Таблица 1.1 — Методы обнаружения присутствия

Метод	Признак неподвижно го человека	Дальность	Цена	Приватност ь	Характерн ые отказы
PIR	отсутствует	5–10 м	★ низкая	безопасен	слеп к сидящему
Видеоаналит ика	силуэт	десятки м	средняя– высокая	формирует изображения	освещённост ь, право
CO ₂	метаболизм	помещение	средняя	безопасен	минуты запаздывани я, вентиляция
Ультразвук	практически нет	3–5 м	низкая	безопасен	потoki воздуха, животные
Ёмкостный	есть	< 0,5 м	низкая	безопасен	только встраивание
Wi-Fi CSI [27]	возмущение канала	помещение	нулевая предельная	без изображени й	зависимость от чужой инфраструкт уры
CW-доплер	дыхание (фаза)	1–5 м	низкая– средняя	без изображени й	подвижные предметы — нужна отбраковка
FMCW [28]	дыхание + дальность	5–10 м	средняя	без изображени й	сложность тракта; массовые модули закрыты

1.1.5 Выбор метода для данной работы

По главному критерию — физический признак неподвижного человека на дальности помещения при сохранении приватности — остаются два кандидата: CW и FMCW. Выбор в пользу квадратурного CW-доплера обоснован тремя доводами. Во-первых, достаточность: для функции «занято/пусто» дальностные стробы не обязательны — отбраковка подвижных предметов достижима алгоритмически по накопленному

смещению (гл. 2.5), что и составляет одну из задач работы. Во-вторых, бюджет и прозрачность: CW-тракт реализуем дискретной схемотехникой с полным доступом к сигналу и допускает честную поэлементную верификацию — что для работы, преследующей в том числе учебные цели, является требованием, а не удобством. В-третьих, преемственность: работа наследует теме дипломного проекта 2020 года (гл. 1.4), выполненного именно на CW-архитектуре, и доводит её до корректной реализации. Проигрыш FMCW по возможностям зафиксирован честно (гл. 3.1): изделие не претендует на конкуренцию с массовыми FMCW-модулями как продукт; его ценность — открытый верифицируемый тракт.

1.1.6 Проверка

Утверждения обзора о физике методов подкреплены источниками: слепота PIR и её следствия — гл. 1.4 и публикации производителей автоматике освещения; доплеровский съём дыхания — монографии [9, 11]; Wi-Fi-сенсорика — стандарт [27]; состояние FMCW — документация производителя [28]; цены — снимок рынка в гл. 3.1. Числовые характеристики собственного метода (дальность 1–5 м, признак дыхания) не заимствованы, а рассчитаны в гл. 1.3 и 2.1 и закреплены тестами репозитория [3]. Оценочные суждения таблицы 1.1 (звёздность цен, характерные отказы) являются экспертными и на точность не претендуют — это карта местности, а не измерение.

Ссылки главы: [3] репозиторий, [9] Boric-Lubecke et al., [11] Li, Lin, [27] IEEE 802.11bf, [28] TI mmWave.

1.2 Доплеровский принцип и квадратурный приём

1.2.1 Доплеровский сдвиг и выбор несущей

Приёмопередатчик непрерывного излучения освещает сцену несущей частотой f_0 ; отражение от цели, движущейся с радиальной скоростью V , смещено по частоте на доплеровскую величину [8]

$$F_{\text{д}} = 2V / \lambda, \quad \lambda = c / f_0. \quad (1.1)$$

Коэффициент 2 отражает двойное прохождение пути. Для несущей 24,125 ГГц ($\lambda = 12,43$ мм [1]) характерные скорости дают: медленный шаг 0,5 м/с — 80 Гц, быстрый шаг 1 м/с — 161 Гц, бег 3 м/с — 482 Гц. Этим определена полоса движения 5–500 Гц, использованная во всех последующих главах.

Выбор несущей 24 ГГц содержателен (и противоположен решению работы 2020 года, гл. 1.4): доплеровские частоты выносятся из области механических вибраций и фликкер-шума в удобную звуковую полосу, а фазовая чувствительность к малым смещениям (п. 1.2.4) растёт обратно пропорционально длине волны.

1.2.2 Комплексная огибающая и информация в фазе

После переноса на нулевую частоту сигнал цели на дальности $R(t)$ описывается комплексной огибающей (модель `model/doppler.py` [3])

$$s(t) = A(R) \cdot \exp(j\varphi(t)), \quad \varphi(t) = -4\pi \cdot R(t) / \lambda. \quad (1.2)$$

Вся кинематика цели содержится в фазе: скорость — в её производной (мгновенная частота (1.1)), смещение — в накопленном набеге

$$\Delta R = -(\lambda/4\pi) \cdot \Delta\varphi. \quad (1.3)$$

Формулы (1.2)–(1.3) — рабочий инструмент глав 2.5 (дискриминатор смещения) и 1.3 (чувствительность к дыханию).

1.2.3 Почему одноканальный приёмник не различает направление

Одноканальный смеситель выдаёт вещественную проекцию огибающей $x(t) = \text{Re } s(t)$. Спектр вещественного сигнала эрмитово симметричен по построению: $X(-f) = X^*(f)$ — энергия на частотах $+F_{\text{д}}$ и $-F_{\text{д}}$ одинакова при любом законе движения. Приближение и удаление цели с равной скоростью дают на выходе одноканального приёмника неразличимые сигналы; знак скорости не теряется в обработке — его нет на входе [18].

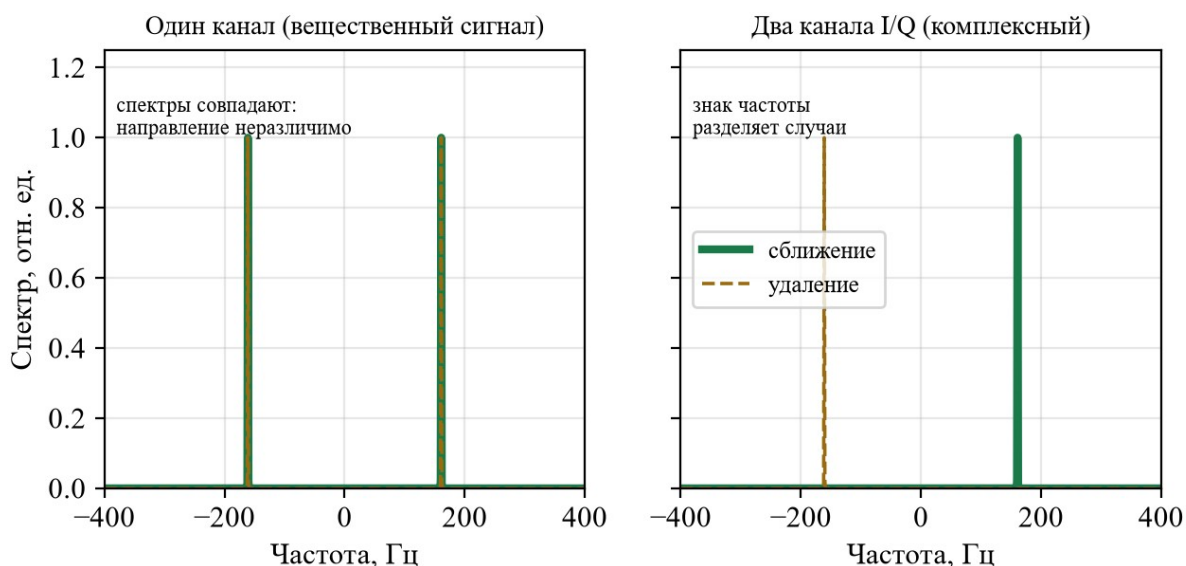


Рисунок 1 — Спектры при сближении и удалении цели: одноканальный приём против квадратурного

Утверждение в работе не постулировано, а исполнено: тест `tests/test_doppler.py::TestDirection` [3] строит оба сценария моделью и показывает совпадение их спектров с точностью машинной арифметики. Следствия этой симметрии для проекта 2020 года разобраны в гл. 1.4.

Квадратурный приёмник снимает вырождение: второй смеситель, опорный сигнал которого сдвинут на 90° , даёт мнимую часть огибающей, и пара (I, Q) восстанавливает $s(t)$ целиком. Спектр комплексного сигнала

несимметричен — знак доплеровской частоты, а с ним направление движения, становится наблюдаемым [9, 18].

1.2.4 Ещё два следствия квадратуры

Нулевые точки. У одноканального приёмника отклик на малое колебание цели пропорционален $\sin \varphi_0$, где φ_0 — фаза, набранная на статической дальности: при φ_0 , кратном π (каждые $\lambda/4 = 3,1$ мм дальности), приёмник слепнет к малым движениям. Дыхание сидящего человека может попасть в такую точку и исчезнуть. Пара I/Q не имеет мёртвых точек: модуль комплексной производной от φ_0 не зависит; арктангенсная демодуляция $\varphi = \text{atan2}(Q, I)$ линейно восстанавливает фазу при любой статической дальности [9, 10].

Демодуляция дыхания. Смещение груди при дыхании (4–12 мм размаха) даёт по (1.2) набег фазы 5–12 рад — сигнал по фазе не мал (гл. 1.3), но периодичен и знакопеременен; для его съёма требуется линейная фазовая демодуляция, то есть опять пара I/Q.

1.2.5 Цена квадратуры: зеркальный канал

Квадратура точна, пока фазовый сдвиг каналов равен 90° . Паспорт модуля допускает отклонение до $\pm 10^\circ$ [1]; при ошибке фазы φ_e (и равных амплитудах) энергия цели просачивается в зеркальную полосу с подавлением [10]

$$\text{IRR} = 20 \cdot \lg(2/\varphi_{e,\text{рад}}) \approx 21,2 \text{ дБ при } \varphi_e = 10^\circ. \quad (1.4)$$

Число 21,2 дБ — сквозное для работы: оно задаёт потолок достоверности знака направления и служит опорой решения об одном АЦП (гл. 2.3, табл. 2.7). Для двоичного решения «вошёл/вышел» подавления в 21 дБ достаточно (ошибка — доли процента энергии); для точной спектральной обработки это предел, заявленный честно.

1.2.6 Проверка

Соотношения (1.1)–(1.4) реализованы функциями модели (`model/doppler.py`, `model/frontend.py` [3]) и закреплены тестами: пересчёт скорость—частота, неразличимость направления одним каналом (исполняемое доказательство), разрешение знака парой I/Q, слепые точки одноканального приёма и их отсутствие у квадратурного, подавление зеркального канала по (1.4) на паспортном допуске. Всего в наборе доплеровской модели 16 тестов; запуск — `make test`.

Ссылки главы: [1] паспорт K-LC2, [3] репозиторий, [8] Финкельштейн, [9] Boric-Lubecke et al., [10] Droitcour, [18] Lyons.

1.3 Энергетика радиолинии

1.3.1 Исходные данные

Все параметры, кроме ЭПР цели, взяты из паспорта модуля K-LC2 [1]: несущая 24,125 ГГц, ЭИИМ 15 дБм, усиление приёмной антенны 8,6 дБи (теоретическое, по конструкции), потери преобразования смесителя –8 дБ (при нагрузке 1 кОм), собственный шум выхода 31 нВ/√Гц (нормирован на 500 Гц). Эффективная площадь рассеяния человека принята $\sigma = 1 \text{ м}^2$ — это оценка: на 24 ГГц ЭПР человека зависит от позы и ракурса и меняется в разы [8]; чувствительность выводов к ней рассмотрена в п. 1.3.4.

Методическое замечание. В первой редакции расчёта усиление антенны было оценено по ширине луча в 12 дБи; паспорт дал 8,6 дБи — ошибка 3,4 дБ. Случай показателен: все производные числа пересчитались автоматически, поскольку расчёт выполнен кодом от единой структуры паспортных данных (`model/frontend.py` [3]), а не таблицей констант в тексте.

1.3.2 Радарное уравнение

Мощность на входе приёмника [8]:

$$P_r = \text{ЭИИМ} \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma / ((4\pi)^3 \cdot R^4). \quad (1.5)$$

Напряжение на выходе смесителя: $P_{IF} = P_r - 8 \text{ дБ}$, $U = \sqrt{(P_{IF} \cdot R_n)}$ при нагрузке 1 кОм. Результаты сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 — Сигнал по дальности ($\sigma = 1 \text{ м}^2$)

Дальность	P_r	U на выходе смесителя, СКЗ
1 м	−47,5 дБм	1,68 мВ
2 м	−59,5 дБм	0,42 мВ
3 м	−66,6 дБм	0,19 мВ
5 м	−75,5 дБм	67 мкВ

Закон R^4 отнимает 12 дБ на каждое удвоение дальности — это жёстче привычного по связи R^2 , поскольку путь проходит дважды, и определяет реалистичную зону дыхания 1–3 м (п. 1.3.4).

1.3.3 Шумовой бюджет и действительные ограничения

Собственный шум модуля в полосе движения 500 Гц: $31 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \cdot \sqrt{500} = 0,69 \text{ мкВ СКЗ}$. Отношение сигнал/шум в полосе движения: 56 дБ на 2 м, 40 дБ на 5 м (для полосы дыхания оценка иная и хуже — см. п. 1.3.3, пункт 2). Тепловой предел (−147 дБм в той же полосе) ниже сигнала пятиметровой дальности на 70 дБ.

Отсюда вывод, определивший строение всей работы: **радиолиния не является узким местом**. Действительные ограничения находятся в низкочастотном тракте, и все они выведены здесь из паспорта [1]:

1. **Статическое смещение выхода смесителя** — до $\pm 200 \text{ мВ}$ против $0,42 \text{ мВ}$

сигнала: отношение 476 (53 дБ). Порождает архитектуру тракта (гл. 2.1).

2. Шум в полосе дыхания. Паспортные 31 нВ/√Гц нормированы на 500 Гц;

на 0,2–0,6 Гц шум модуля не нормирован, а у смесителя в этой области есть собственный 1/f. Сверх того, доминирующий вклад в полосе дыхания вносит не модуль, а тепловой шум резистора смещения 10 МОм самого тракта (приведённый ко входу шум 45–99 нВ/√Гц на 0,2–0,6 Гц, гл. 2.1) — в 1,5–3 раза выше паспортного шума модуля. Поэтому отношение сигнал/шум в полосе дыхания заметно хуже строк таблицы 1.2, и его нельзя заявлять числом без измерений (п. 1.3.5). Порождает требование к ОУ (гл. 2.1).

3. Динамический диапазон 28 дБ по дальности плюс ±10 дБ разброса ЭПР —

при запрете на АРУ (фазовая линейность, гл. 2.1).

4. Чистота питания: при подавлении помех питания 25 дБ [1] пульсации

шины модуля свыше 0,75 мВ создают наводку более 10% сигнала на 2 м (гл. 3.1, схема питания).

1.3.4 Фазовая чувствительность и зона дыхания

По (1.3) смещение груди Δx создаёт набег фазы $4\pi \cdot \Delta x / \lambda$. На $\lambda = 12,4$ мм: спокойное дыхание (5 мм размаха) — 5,1 рад; глубокое (12 мм) — 12 рад, то есть почти два полных оборота, что требует разворачивания фазы в обработке (гл. 2.5); пульс (0,5 мм) — 0,5 рад, вне задач работы.

По фазе дыхание — не малый сигнал (радианы, не миллирадианы); трудность его съёма создают смещение (п. 1.3.3-1) и шум в полосе дыхания (п. 1.3.3-2). Но у фазового расчёта есть важная оговорка: он предполагает, что вся эффективная площадь рассеяния цели (принятая $\sigma = 1 \text{ м}^2$) движется вместе с грудной клеткой. В действительности модулируется лишь часть отражающей поверхности; неподвижные части тела, стены и мебель дают статические отражения, а в СВ-радаре сигналы всех отражателей складываются в один комплексный вектор. Поэтому эффективная ЭПР

модулированной дыханием составляющей меньше полной, и приведённый выше сигнал дыхания — оценка сверху. По этой причине, а также из-за неопределённого шума (п. 1.3.3-2), в характеристиках изделия зона уверенного дыхания ограничена 1–3 м и заявляется как расчётная, не измеренная; 5 м отнесены к движению.

Чувствительность к σ : вариация ЭПР ± 10 дБ смещает строки таблицы 1.2 на ± 5 дБ по напряжению ($\sqrt{}$), что эквивалентно изменению дальности примерно в 1,78 раза ($\sqrt[3]{10}$). Выводы о зонах, таким образом, чувствительны к разбросу ЭПР и должны пониматься как порядковые.

1.3.5 Проверка

Числа таблицы 1.2, шумовой бюджет (включая тепловой шум резистора 10 МОм) и фазовые набег вычисляются функциями `model/frontend.py` и `model/doppler.py` [3] из паспортной структуры данных и закреплены тестами (`tests/test_frontend.py`, 31 тест, включая запасы к санитарным нормам — гл. 3.2). Оговорки, ограничивающие расчёт в полосе дыхания, перечислены явно: спектральная плотность шума модуля на 0,2–0,6 Гц в паспорте отсутствует и экстраполирована с 500 Гц (умножение на $\sqrt{\text{полоса}}$ неявно предполагает белый спектр, чего паспорт не устанавливает); доля ЭПР, модулируемой грудной клеткой, не определена; многолучёвость и несколько отражателей не учтены. Поэтому отношение сигнал/шум в полосе дыхания — оценка сверху; его инструментальная проверка отнесена к испытаниям на железе (заключение).

Ссылки главы: [1] паспорт K-LC2, [3] репозиторий, [8] Финкельштейн (радарное уравнение, ЭПР).

1.4 Разбор работы 2020 года

Настоящая работа наследует тему выпускной квалификационной работы автора «Радиосистема охраны периметра аэропорта с СВЧ датчиками

движения» (ГУАП, 2020) [29]. Работа 2020 года была расчётной, без макета. Пересмотр её с накопленным опытом обнаружил две ошибки, каждая из которых ломает конструкцию; их разбор приведён потому, что из него выведены ключевые требования настоящей работы. Полный разбор — docs/02 репозитория [3].

1.4.1 Ошибка первая: несущая 120 МГц

Работа 2020 года выбирала несущую 120 МГц, мотивируя выбор санитарными ограничениями. По (1.1) доплеровский сдвиг от шага человека (1 м/с) на такой несущей составляет **0,8 Гц** — в области механических вибраций конструкции и дрейфа аппаратуры, где полезный сигнал неотделим от помех. Показательно, что текст 2020 года сам констатировал «низкую виброустойчивость... доплеровские частоты лежат в диапазоне механических вибраций», не распознав в этом следствие собственного выбора несущей.

Ошибка сопровождалась внутренним противоречием: физическая часть работы оперировала числами X-диапазона (длина волны «2 см», доплеровские частоты «10–40 Гц», мощности типовых модулей 10 ГГц), тогда как расчётная закрепляла 120 МГц. Следствия не сходились и геометрически: волноводный тракт на 120 МГц имел бы широкую стенку порядка 1,25 м.

Мотивировка выбора была неверна юридически: санитарные нормы ограничивают плотность потока энергии, а не несущую частоту (гл. 3.2 настоящей работы показывает соответствие нормам на 24 ГГц с запасом 40 раз).

Урок, реализованный здесь: несущая 24,125 ГГц переносит доплеровские частоты в полосу 80–480 Гц — на два порядка выше вибрационной области — и вдвое против X-диапазона поднимает фазовую чувствительность к дыханию (гл. 1.2, 1.3).

1.4.2 Ошибка вторая: направление на одноканальном приёмнике

Работа 2020 года определяла направление движения цели сравнением двух логических сигналов (функция XNOR) после одноканального приёмника. Как показано в п. 1.2.3, спектр вещественного сигнала эрмитово симметричен, и одноканальный приёмник не содержит информации о знаке скорости — никакая последующая обработка её не извлечёт. Схема 2020 года сравнивала сигнал с его же копией.

Существенное прямое следствие для главной защиты от ложных тревог. Отсев 2020 года формулировался так: «объект сместился более чем на 0,25 м и не вернулся на место — тревога; вернулся — качание растительности». Но смещение есть интеграл *знаковой* скорости; одноканальный приёмник даёт лишь модуль, интеграл модуля — длину пути. Качающаяся ветка набирает метры пути, оставаясь на месте, и по длине пути неотличима от идущего человека. **Алгоритм 2020 года требовал квадратурного приёма на уровне физики, а аппаратура работы его не предусматривала** — дискриминатор не мог работать в принципе.

1.4.3 Что унаследовано и что изменено

Сама идея дискриминатора «возврата на место» верна и составляет удачную часть работы 2020 года. Здесь она доведена до реализации на квадратурном приёмнике, где смещение действительно вычислимо (гл. 2.5, порог 0,25 м сохранён), и проверена на модельных сценариях, включая листву. Сводка изменений — таблица 1.3.

Таблица 1.3 — От работы 2020 года к настоящей

	2020 [29]	Настоящая работа	Причина
Несущая	120 МГц	24,125 ГГц	F _д : 0,8 Гц против 161 Гц (п. 1.4.1)
Приёмник	одноканальный	квадратурный I/Q	знак скорости, нулевые точки, фаза (гл. 1.2)
СВЧ-часть	собственная схема	готовый модуль K-LC2	усилие переносится в тракт и обработку
Задача	охрана периметра	датчик занятости	зона дыхания 1–3 м соответствует помещению (гл. 1.3)
Форма проверки	однократный расчёт	исполняемая модель и тесты	воспроизводимость (гл. 2.2)

Методический вывод из обеих ошибок один, и он определил форму настоящей работы. Обе ошибки 2020 года — рассогласование частей расчёта и алгоритм, несовместимый с собственной аппаратурой, — принадлежат классу ошибок согласованности, которые не обнаруживаются чтением отдельных глав и обнаруживаются немедленно при попытке исполнить работу как целое. Поэтому здесь каждый результат существует в исполняемой форме, а согласованность глав проверяется автоматически при каждом изменении (гл. 2.2).

1.4.4 Проверка

Количественные утверждения разбора воспроизводимы: доплеровские частоты — по (1.1) (тесты модели [3]); неспособность одноканального приёмника дать знак — исполняемое доказательство `tests/test_doppler.py` [3]; провал дискриминатора на длине пути вместо смещения — модельный тест листвы. Цитаты и параметры работы 2020 года — по её тексту [29]; один смежный вопрос (реализуемость заявленного там генератора на 120 МГц) оставлен открытым за недоступностью документации компонента и на выводы не влияет.

Ссылки главы: [3] репозиторий (docs/02 — полный разбор), [29] работа 2020 года.

2.1 Аналоговый тракт

2.1.1 Исходные данные и требования

Тракт усиливает квадратурные сигналы промежуточной частоты модуля K-LC2 до уровня, пригодного для оцифровки встроенным АЦП микроконтроллера. Каналов два — I и Q, идентичных; далее описан один. Требования к тракту выведены в главах 1.3 и 2.3 и сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 — Требования к аналоговому тракту

Параметр	Значение	Основание
Входной сигнал	67 мкВ – 1,7 мВ СКЗ	расчёт радиолинии для 5–1 м (гл. 1.3)
Входное смещение	до ± 200 мВ	паспорт K-LC2 [1]
Полоса пропускания	0,05–500 Гц	дыхание 0,2–0,6 Гц; движение до 3 м/с $\rightarrow$ 482 Гц
Собственный шум	ниже 31 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ во всей полосе	не ухудшать шум модуля [1]
Выход	~ 2 В размаха вокруг 1,65 В	АЦП с шиной 3,3 В (гл. 2.3)
Согласование каналов	вклад тракта меньше вклада модуля	подавление зеркального канала (п. 2.1.6)

2.1.2 Центральное противоречие и его разрешение

Конструкцию тракта определяет одно число из паспорта модуля. Постоянное смещение на выходе смесителя K-LC2 достигает ± 200 мВ, тогда как полезный сигнал от человека на расстоянии 2 м составляет 0,42 мВ СКЗ (гл. 1.3). Отношение помехи к сигналу:

$$200 \text{ мВ} / 0,42 \text{ мВ} \approx 476. \quad (2.1)$$

Прямое усиление недопустимо: при требуемом усилении 200 смещение превратилось бы в ± 40 В при шине питания 3,3 В. Допустимое усиление по постоянному току ограничено половиной шины:

$$G(0) \leq 1,65 \text{ В} / 0,2 \text{ В} \approx 8,25. \quad (2.2)$$

Следовательно, смещение должно быть подавлено до основного усиления. Стандартное для датчиков движения решение — фильтр верхних частот со срезом 5–10 Гц — здесь неприменимо: на частоте дыхания 0,3 Гц такой фильтр ослабляет сигнал в 17 раз и лишает датчик его главного свойства — способности видеть неподвижного человека. Верхняя граница среза задана дыханием (0,2 Гц — 12 циклов в минуту), нижняя — необходимостью подавить смещение за приемлемое время установления. Выбран срез 0,048 Гц — вчетверо ниже нижней границы полосы дыхания, что даёт ослабление сигнала дыхания около 3% на нижней границе (0,2 Гц) при полном подавлении постоянной составляющей. Дыхание, однако, режет не только этот фильтр: в прошивке стоит второй ФВЧ — цифровой вычитатель постоянной со срезом 0,05 Гц (гл. 2.5). Каскад двух фильтров ослабляет сигнал на 0,2 Гц уже примерно на 6%, и это суммарное число, а не 3%, следует принимать за потерю в полосе дыхания.

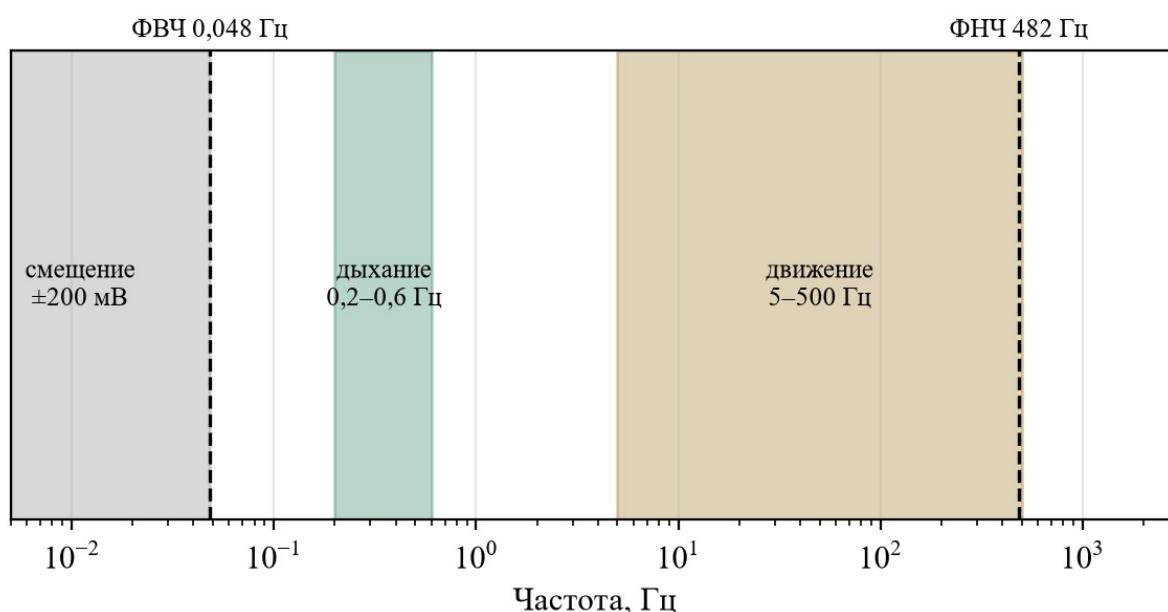


Рисунок 2 — Распределение полос: смещение, дыхание и движение на оси частот

2.1.3 Структура тракта

Структура канала: разделительная RC-цепь (ФВЧ первого порядка) — два неинвертирующих усилительных каскада — RC-фильтр нижних частот перед АЦП. Общее усиление 200 (46 дБ) разнесено на каскады 10 и 20.

Разнесение обосновано устойчивостью и полосой: один каскад с усилением 200 потребовал бы от усилителя произведения усиления на полосу не менее 100 кГц только для полосы сигнала, а запас петлевого усиления, от которого зависит точность коэффициента передачи, был бы минимален. У выбранного ОУ (п. 2.1.4) произведение усиления на полосу 10 МГц; при усилении 20 петлевое усиление на верхней границе полосы сигнала превышает 60 дБ, и коэффициент каскада определяется резисторами, а не свойствами усилителя.

Средняя точка 1,65 В формируется резистивным делителем с буферным повторителем. Буфер обязателен: через резисторы обратной связи нижнего плеча (1 кОм) протекает сигнальный ток, и при небуферированном делителе (выходное сопротивление 5 кОм) коэффициенты усиления обоих каналов зависели бы от него, а каналы оказались бы связаны через общую опору.

2.1.4 Выбор элементов

Разделительная цепь. Номиналы ФВЧ: $C = 0,33 \text{ мкФ}$, $R = 10 \text{ МОм}$:

$$f_{\text{ср}} = 1 / (2\pi \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6}) = 0,048 \text{ Гц.} \quad (2.3)$$

Резистор 10 МОм допустим только при малом входном токе усилителя: ток смещения создаёт на нём постоянную ошибку. У выбранного ОРА388 ток смещения типично 150 пА, что даёт 1,5 мВ. Сравнивать эту ошибку следует не с подавляемыми 200 мВ (их снимает фильтр), а с оставшимся после фильтра входным запасом по постоянному току: при усилении 200 и полушине 1,65 В он равен $1,65/200 \approx 8,25 \text{ мВ}$. Ошибка 1,5 мВ — это около

18% запаса; величина заметная, хотя и не исчерпывающая его. Усилитель общего применения с током смещения в единицы наноампер потребовал бы снизить сопротивление на порядок и во столько же раз увеличить ёмкость (3,3 мкФ), что исключает плёночное исполнение разумного размера. Конденсатор — плёночный: ток утечки электролитического конденсатора на резисторе 10 МОм создал бы собственное смещение, сравнимое с подавляемым.

Цена решения — время установления. Постоянная времени цепи 3,3 с; выход на 1% остаточного отклонения занимает около 16 с. После включения питания или скачка смещения тракт слеп примерно четверть минуты. Для датчика занятости это приемлемо и отражено в руководстве по наладке (гл. 3.2).

Операционный усилитель. Определяющее требование — шум на частоте дыхания. У усилителей общего применения в области долей герца доминирует фликкер-шум ($1/f$): типичные значения на 0,2 Гц — сотни $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, что на порядок выше собственного шума модуля ($31 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ [1]) и сделало бы тракт главным источником шума именно в той полосе, ради которой он строится. Выбран ОРА388 — усилитель с автообнулением (chopper): периодическая компенсация смещения переносит энергию фликкер-шума на частоту прерывания, и спектральная плотность шума остаётся ровной ($8,5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$) до самых низких частот [2]; принцип и сравнение архитектур — в [13]. Параметры, существенные для схемы, сведены в таблицу 2.2.

Здесь необходима важная оговорка. Малошумящий ОУ — условие необходимое, но не достаточное: собственный тепловой шум резистора смещения 10 МОм составляет около $400 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Тот же конденсатор ФВЧ частично шунтирует его, но в полосе дыхания — недостаточно: приведённый ко входу шум резистора здесь $32\text{--}93 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ($0,6\text{--}0,2 \text{ Гц}$), то есть сопоставим с шумом модуля или выше. Поэтому требование «собственный шум тракта ниже $31 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ во всей полосе» в полосе дыхания расчётом не выполняется

— доминирует резистор, а не ОУ (расчёт — `model/frontend.py`, `input_noise_density` [3]). В полосе движения (5–500 Гц) резистор шунтирован полностью и роли не играет. Снизить его вклад можно лишь уменьшением сопротивления с пропорциональным ростом ёмкости, что возвращает к неудобным номиналам; для данной версии это принято как ограничение чувствительности к дыханию, а не устранено.

Таблица 2.2 — Требования к ОУ и параметры ОРА388

Параметр	Требование	ОРА388 [2]
Шум на 0,2 Гц	$< 31 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$	8,5 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, без 1/f-составляющей
Ток смещения	$< 1 \text{ нА}$ (для $R = 10 \text{ МОм}$)	150 пА
Напряжение смещения	мкВ (усиливается в 200 раз)	0,25 мкВ
Питание	однополярное 3,3 В	2,7–5,5 В, rail-to-rail
Произведение усиления на полосу	$> 1 \text{ МГц}$	10 МГц

Взаимозаменяемые аналоги — ADA4522, LTC2057; требования закрывают все три, выбор определяется ценой и доступностью (гл. 3.1).

Фильтр нижних частот. Номиналы $R = 3,3 \text{ кОм}$, $C = 100 \text{ нФ}$ дают срез 482 Гц — по верхней границе полосы движения. Роль фильтра — антиалиасинговая; его достаточность при выбранной частоте дискретизации 20 кГц показана в гл. 2.3: на частоте Найквиста 10 кГц фильтр первого порядка обеспечивает $-26,5 \text{ дБ}$, и необходимости во втором порядке нет.

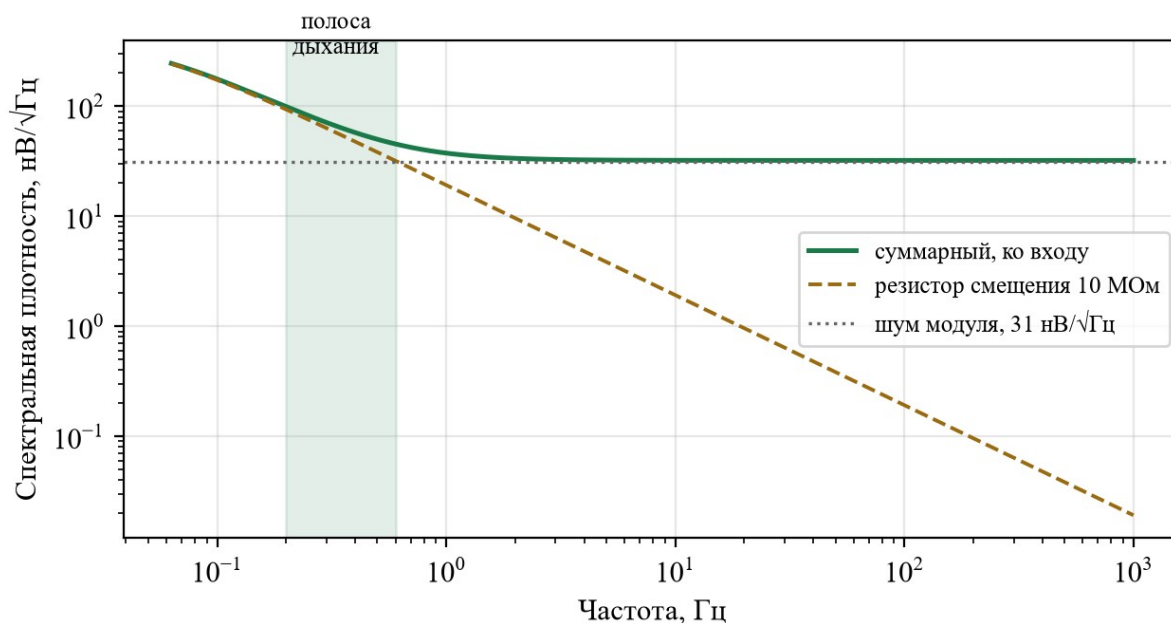


Рисунок 3 — Приведённый ко входу шум: в полосе дыхания доминирует резистор смещения 10 МОм

2.1.5 Динамический диапазон

Усиление 200 выбрано по ближней границе рабочей зоны. Расчётные уровни на выходе тракта приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Сигнал на выходе тракта (усиление 200)

Дальность	Вход, СКЗ	Выход, СКЗ	Доля шины 3,3 В (размах)
1 м	1,68 мВ	336 мВ	29%
2 м	0,42 мВ	84 мВ	7,2%
5 м	67 мкВ	13 мВ	1,1%

Диапазон дальностей 1–5 м укладывается в шину без насыщения. Разброс эффективной площади рассеяния цели (± 10 дБ, гл. 1.3) добавляет множитель 3 в обе стороны: на 1 м с крупной целью тракт подходит к границе линейности. Автоматическая регулировка усиления отвергнута сознательно: АРУ вносит переменный фазовый сдвиг, а на стабильности фазы держится и детекция дыхания, и знак направления (гл. 2.5). Слабый сигнал дальней цели компенсируется не в аналоговой части, а разрешением оцифровки (гл. 2.3).

2.1.6 Питание и согласование каналов

Подавление пульсаций питания у модуля составляет 25 дБ [1] — пульсации шины 5 В проникают на выход смесителя ослабленными лишь в 18 раз, в обход всего тракта. Чтобы наводка не превышала 10% сигнала на дальности 2 м, пульсации питания модуля не должны превышать

$$\Delta U \leq 0,1 \cdot 0,42 \text{ мВ} \cdot 10^{(25/20)} \approx 0,75 \text{ мВ}. \quad (2.4)$$

Это требование определяет схему питания (гл. 3.1): линейный стабилизатор модуля, RC-развязка каждого корпуса ОУ, соединение аналоговой и цифровой земель в одной точке.

Подавление зеркального канала — а с ним достоверность знака направления — ограничено рассогласованием квадратуры. Паспортное отклонение фаз модуля $\pm 10^\circ$ задаёт предел 21,2 дБ (гл. 1.2); рассогласование усиления каналов тракта складывается с ним. Чтобы вклад тракта оставался пренебрежимым, резисторы, задающие усиление, выбраны с допуском 0,1%, конденсаторы фильтров — 1% (плёнка и NP0). Остаточное рассогласование компенсируется цифровой поправкой по эталонной цели (гл. 2.5).

2.1.7 Поведение при включении и сбоях питания

Срез 0,048 Гц имеет обратную сторону — время установления. После подачи питания напряжение на разделительной RC-цепи спадает с постоянной времени 3,3 с; выход тракта достигает установившегося режима (1% остаточного отклонения) примерно за 16 с (п. 2.1.4). Этот интервал требует явного описания поведения, иначе он читается как провал в работе датчика.

В течение установления выход тракта содержит крупный пусковой переходник, не связанный с целью. Проектом он трактуется не как сигнал, подлежащий разбору, а как слепое окно: детектор в этот интервал не пытается отличить переходник от движения, а удерживает состояние

«занято» принудительно (стартовая политика «включение = занято», реализуемая инициализацией таймера удержания (гл. 2.5) на длительность установления). Тем самым помещение при подаче питания не остаётся неосвещённым; на системном уровне тот же интервал эквивалентно перекрывается кратковременным управлением по ИК-датчику. По истечении установления дрейф основания опускается ниже порога движения, и детектор переходит в штатный режим; детекция дыхания, опирающаяся на стабильное основание, также становится достоверной только после установления — это честное ограничение первых ~ 16 с.

Интервал 16 с — однократный, при монтаже. Кратковременная просадка питания (доли секунды) не разряжает конденсатор разделительной цепи (0,33 мкФ на 10 МОм, $\tau = 3,3$ с) сколь-нибудь существенно, и повторного установления не вызывает; полный цикл 16 с возобновляется лишь после обесточивания с разрядом конденсатора. Температурный дрейф смещения у автообнуляемого ОРА388 (порядка 0,25 мкВ/°C) пренебрежимо мал против подавляемых фильтром 200 мВ и к повторному установлению не приводит. Стартовая политика реализована в ядре обработки (инициализация таймера удержания на длительность установления) и проверена на хосте: пустая комната при включении держится «занято» и гаснет у отметки установления ~ 16 с (гл. 2.5.6). На железе остаётся подтвердить поведение на включении реального питания.

2.1.8 Проверка

Результаты главы проверены двумя независимыми способами.

Аналитический расчёт закреплён набором из 25 автоматических тестов (tests/test_frontend.py репозитория [3]): каждое число таблиц 2.1–2.3 вычисляется из паспортных данных и сверяется с приведённым здесь; изменение паспорта или номинала делает расхождение видимым немедленно.

Схемотехническая проверка выполнена в симуляторе ngspice (нетлист `spice/frontend.cir` [3]). Рабочая точка при наихудшем паспортном смещении +200 мВ: напряжение на входе первого усилителя составило 1,650000 В — разделительная цепь подавляет смещение полностью, до усиления оно не доходит. АЧХ: усиление в полосе 198,3 (расчёт — 200), срезы 0,049 и 474 Гц (расчёт — 0,048 и 482 Гц); расхождения не превышают 2% и объясняются конечным усилением ОУ и взаимной нагрузкой звеньев, отсутствующими в аналитических формулах. Ограничение проверки: модель ОУ поведенческая, без шин питания, поэтому насыщение и шум симуляцией не охвачены — шумовой расчёт выполнен аналитически (гл. 1.3), насыщение исключено запасом п. 2.1.5.

Ссылки главы — по мастер-списку sources.md: [1] паспорт K-LC2, [2] паспорт ОРА388, [3] репозиторий проекта, [12] Хоровиц и Хилл (шумы и токи смещения, общая опора), [13] Jung (chopper-усилители), [19] ngspice.

2.2 Верификация аналоговой части

2.2.1 Методика: расчёт как исполняемый код

Традиционная форма инженерного расчёта — таблица чисел в тексте — обладает известным пороком: при изменении любого исходного данного (уточнение паспорта, замена номинала) все производные числа устаревают молча. Проект 2020 года (гл. 1.4) пострадал именно от этого: расчёты, выполненные однажды, не пересматривались при смене элементной базы.

В настоящей работе принята другая дисциплина. Все паспортные данные модуля собраны в одной структуре программной модели (`model/frontend.py` [3]); каждое производное число — усиление, срезы, уровни, шумы — вычисляется из них функцией, а каждая таблица настоящей записки продублирована автоматическим тестом. Набор из 25 тестов аналоговой части (`tests/test_frontend.py` [3]) выполняется командой `make`

test; расхождение между паспортом, расчётом и заявленным в документации числом обнаруживается при каждом запуске, а не при переписывании записки.

Аналитический расчёт, однако, проверяет только самого себя: формулы п. 2.1 выведены в предположении идеального усилителя и развязанных звеньев. Независимую проверку даёт схемотехническое моделирование: тот же тракт, собранный из моделей компонентов, обсчитывается симулятором ngspice [19] без использования формул главы 2.1. Совпадение двух путей — аналитического и схемотехнического — и составляет верификацию.

2.2.2 Модель и условия

Нетлист spice/frontend.cir [3] описывает один канал тракта: разделительная цепь 0,33 мкФ / 10 МОм, два неинвертирующих каскада, выходной ФНЧ, источник опоры 1,65 В. Операционный усилитель представлен поведенческой однополюсной моделью: усиление без обратной связи 10^6 , произведение усиления на полосу 10 МГц — по паспорту ОРА388 [2].

Выполнены два анализа:

— рабочая точка (.op) при постоянном смещении на входе +200 мВ — наихудший

паспортный случай [1]: проверяется, что смещение не достигает усилителей;

— частотная характеристика (.ac) от 1 мГц до 100 кГц: проверяются усиление

в полосе и положение срезов.

2.2.3 Результаты

Рабочая точка при входном смещении +200 мВ приведена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 — Рабочая точка тракта при паспортном смещении +200 мВ

Узел	Расчёт	Симуляция
Вход первого ОУ	1,65 В	1,650000 В
Выход первого каскада	1,65 В	1,650000 В
Выход тракта	1,65 В	1,650000 В

Смещение подавлено полностью: разделительная цепь не пропускает постоянную составляющую, и внутри тракта паспортные ± 200 мВ не проникают. Это подтверждает центральное решение главы 2.1 — снятие смещения до усиления.

Частотная характеристика сведена в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 — АЧХ тракта: аналитический расчёт против симуляции

Параметр	Расчёт (гл. 2.1)	Симуляция	Расхождение
Усиление в полосе	200 (46,0 дБ)	198,3 (45,9 дБ)	0,9%
Нижний срез (–3 дБ)	0,048 Гц	0,049 Гц	2%
Верхний срез (–3 дБ)	482 Гц	474 Гц	1,7%

Расхождения объяснимы и ожидаемы: аналитические формулы не учитывают конечное петлевое усиление ОУ и взаимную нагрузку соседних звеньев (выходной ФНЧ нагружает второй каскад; см. [12], разд. о точности усилителей с обратной связью). Величина расхождений — до 2% — меньше вклада допусков реальных элементов (резисторы 0,1%, конденсаторы 1%, п. 2.1.6), что позволяет считать аналитическую модель достаточной для всех дальнейших выводов.

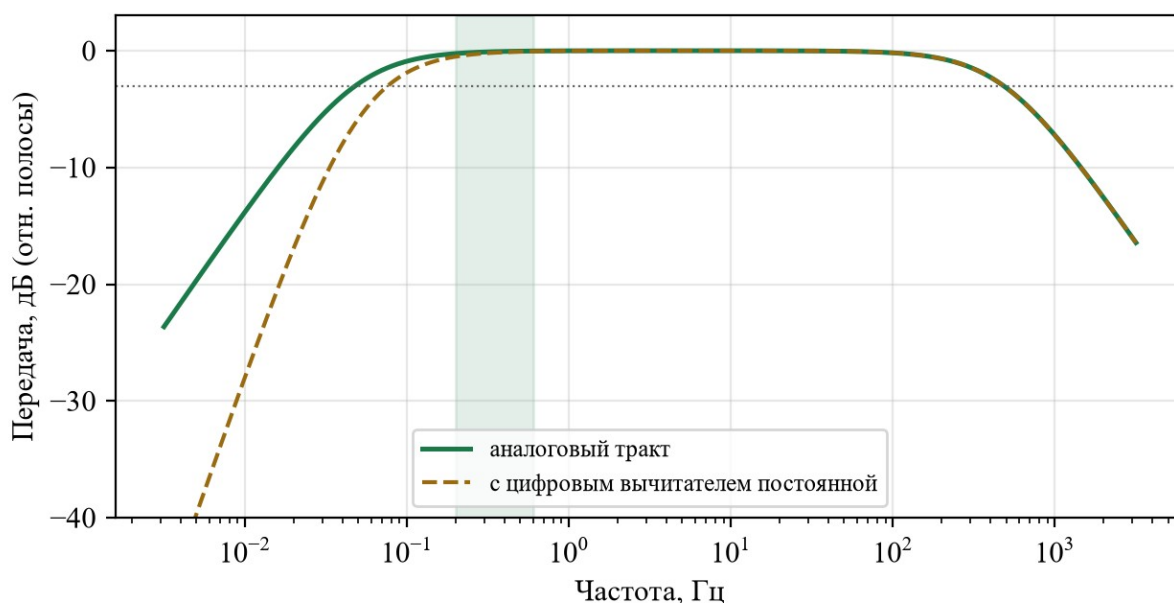


Рисунок 4 — АЧХ тракта и дополнительный вклад цифрового вычитателя постоянной

2.2.4 Границы применимости проверки

Поведенческая модель ОУ не содержит шин питания, шума и входных токов. Следствия перечислены явно.

1. Насыщение выходов симуляцией не проверено. Оно исключено расчётом

запаса п. 2.1.5 (29% шины на ближней границе); проверка на железе — контрольные точки постоянных напряжений в методике наладки (гл. 3.1).

2. Шумовой анализ (.noise) с поведенческой моделью бессодержателен; шумовой

бюджет построен аналитически в гл. 1.3 на паспортных плотностях [1, 2] по методике [14].

3. Ток смещения ОУ (150 пА на резисторе 10 МОм — ошибка 1,5 мВ, п. 2.1.4)

в модели отсутствует; учтён аналитически.

Замена поведенческой модели фирменной макромоделью ОРА388 [2] сняла бы ограничения 2 и 3; это отмечено в перечне оставшихся работ (закключение).

2.2.5 Проверка

Содержание главы закреплено исполняемо: нетлист и оба анализа запускаются командой `make spice` [3]; числа таблиц 2.4–2.5 сверены с выводом симулятора; соответствие аналитической модели и допусков — тестами `tests/test_frontend.py`. Изменение любого номинала в нетлисте без согласованного изменения модели делает расхождение видимым при первом запуске тестов.

Ссылки главы: [1] паспорт K-LC2, [2] паспорт ОРА388, [3] репозиторий, [12] Хоровиц и Хилл, [14] Kester (шумовой расчёт), [19] ngspice.

2.3 Оцифровка и выбор микроконтроллера

2.3.1 Постановка

Оцифровке подлежат два канала (I и Q) с полосой 0,05–500 Гц и уровнями 13–336 мВ СКЗ (табл. 2.3). Кандидаты — два распространённых микроконтроллера семейства STM32 с ядром Cortex-M4F: F411 [4] и G431 [5]. Формальное сравнение приведено в таблице 2.6.

Таблица 2.6 — Кандидаты

Параметр	STM32F411 [4]	STM32G431 [5]
Ядро	M4F, 100 МГц	M4F, 170 МГц
ОЗУ	128 КБ	32 КБ
Flash	512 КБ	128 КБ
АЦП	1 × 12 бит, 2,4 MSPS	2 × 12 бит, одновременная выборка
Аппаратный оверсэмплинг	нет	до 16 бит
Ускорители	нет	CORDIC, FMAC

По перечню возможностей G431 выглядит предпочтительнее. Дальнейшее содержание главы — проверка того, нужны ли эти возможности

данному изделию. Спор решают два расчёта: цена единственного АЦП и цена 12 разрядов.

2.3.2 Один АЦП против двух

Учебное положение гласит: квадратурному приёмнику необходимы два АЦП с одновременной выборкой, поскольку перекос выборок каналов I и Q превращается в ошибку фазы, а фаза несёт знак доплеровского сдвига [9, 10]. Положение верно по форме; проверим его числами данного изделия.

Единственный АЦП F411 опрашивает каналы поочерёдно. При тактовой частоте АЦП 25 МГц, выборке 15 тактов и разрядности 12 тактов время одного преобразования составляет

$$t = (15 + 12) / 25 \cdot 10^6 = 1,08 \text{ мкс}, \quad (2.5)$$

на столько выборка Q отстаёт от выборки I. Задержка Δt на частоте f эквивалентна ошибке фазы $\varphi = 360^\circ \cdot f \cdot \Delta t$, максимальной на верхней границе полосы (500 Гц):

$$\varphi = 360^\circ \cdot 500 \cdot 1,08 \cdot 10^{-6} = 0,19^\circ. \quad (2.6)$$

Ошибке фазы φ соответствует подавление зеркального канала [10]:

$$\text{IRR} = 20 \cdot \lg(2 / \varphi_{\text{рад}}) \approx 55,4 \text{ дБ}. \quad (2.7)$$

Сравним с ограничением самого модуля. Паспортное отклонение квадратуры K-LC2 — до $\pm 10^\circ$ [1], что задаёт предел подавления 21,2 дБ (гл. 1.2). Обе ошибки — квадратура модуля и перекос выборок — детерминированные, а не независимые случайные. Поэтому складывать их надо в худшем случае по фазе (одного знака), а не как независимые мощности: суммарная фазовая ошибка $10^\circ + 0,19^\circ = 10,19^\circ$ даёт подавление 21,0 дБ. Итог — в таблице 2.7.

Таблица 2.7 — Бюджет подавления зеркального канала (худший случай)

Причина	Подавление
Квадратура модуля, $\pm 10^\circ$ по паспорту	21,2 дБ
Перекус выборок одного АЦП (1,08 мкс), $0,19^\circ$	55,4 дБ
Сумма фаз $10,19^\circ$ (худший случай)	21,0 дБ
Два АЦП (перекус нулевой)	21,2 дБ

Цена единственного АЦП — около 0,17 дБ (ранее ошибочно оценивалась как 0,002 дБ при неверном сложении по мощности). Вывод при этом сохраняется: 0,17 дБ мало, и для двоичного решения «вошёл/вышел» единственного АЦП достаточно. Оговорка: сами 21 дБ подавления — не гарантия вероятности верного определения направления; связь с вероятностью ошибки зависит от отношения сигнал/шум, времени наблюдения и наличия встречных целей и здесь не оценивается (отнесено к испытаниям). Перекус, кроме того, детерминирован и компенсируется поворотом фазы в прошивке.

2.3.3 Достаточность 12 разрядов

Обратный по направлению результат обнаружился там, где вопроса, казалось, не было. Частота дискретизации 2 кГц — вдвое выше полосы — выглядит естественным выбором и оказывается ошибкой.

Усиление тракта ограничено сверху ближней целью (п. 2.1.5), поэтому дальняя цель приходит на АЦП малой: 13 мВ СКЗ при дальности 5 м — 0,8% шкалы. Единственный ресурс различимости — собственный шум канала оцифровки.

Шум квантования 12-разрядного АЦП при шкале 3,3 В [14]:

$$\sigma_{\text{кв}} = q/\sqrt{12} = (3,3/4096)/\sqrt{12} = 233 \text{ мкВ СКЗ}, \quad (2.8)$$

равномерно распределённый до частоты Найквиста. В полосу сигнала 500 Гц попадает доля, пропорциональная корню отношения полос:

$$\sigma_{\text{полоса}} = \sigma_{\text{кв}} \cdot \sqrt{(500 / (f_{\text{д}}/2))}. \quad (2.9)$$

Собственный шум модуля, приведённый к АЦП: $31 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \cdot 200 \cdot \sqrt{500} = 139 \text{ мкВ}$. Сравнение по (2.9) даёт таблицу 2.8.

Таблица 2.8 — Шум квантования в полосе 500 Гц против шума модуля (139 мкВ)

Частота дискретизации	Шум квантования в полосе	Деградация тракта
2 кГц	165 мкВ	3,8 дБ
8 кГц	82 мкВ	1,5 дБ
20 кГц	52 мкВ	0,57 дБ

При дискретизации 2 кГц квантование громче всего аналогового тракта: малошумящий усилитель главы 2.1 обесценивается на последнем шаге цепи. Поднять сигнал нельзя — упор в ближнюю цель; поднять надо разрешение. Принята передискретизация: частота 20 кГц с последующей децимацией до 2 кГц (гл. 2.5). Вклад квантования падает до 0,57 дБ; стоимость — 40 тыс. выборок/с на два канала, 1,7% паспортной производительности АЦП F411. Приём штатный и рекомендован производителем [6]; правило «четырёхкратная передискретизация — один эффективный разряд» [14] даёт здесь 1,66 дополнительных разряда.

Оговорка о применимости расчёта. Формула $q/\sqrt{12}$ и равномерное распределение шума квантования до Найквиста верны, когда ошибка квантования близка к белой и не коррелирована с сигналом; для этого нужен достаточный дитеринг. Приведённый к АЦП аналоговый шум ($\approx 139 \text{ мкВ}$, около 0,17 младшего разряда) для полной рандомизации кодов, вообще говоря, мал, и без специального дитеринга выигрыш от передискретизации может оказаться меньше расчётного. Кроме того, реальный эффективный разрядный охват (ENOB) STM32F411, шум опоры, интегральная и дифференциальная нелинейности АЦП здесь не учтены. Поэтому «1,66 разряда» и «деградация 0,57 дБ» относятся к идеальному АЦП и задают верхнюю границу качества; фактические числа — предмет измерений на железе.

Побочный результат передискретизации закрывает вопрос, оставленный открытым в гл. 2.1: антиалиасинговый фильтр. При дискретизации 2 кГц фильтр первого порядка со срезом 482 Гц обеспечивал на частоте Найквиста лишь $-7,4$ дБ, и требовался второй порядок. При 20 кГц частота Найквиста отодвигается до 10 кГц, где тот же фильтр даёт $-26,5$ дБ, а частоты, способные наложиться на полосу сигнала (от 19,5 кГц), подавлены на -32 дБ. Второй аналоговый порядок не нужен; крутизна среза переносится в цифровой дециматор, где она бесплатна и фазово-линейна.

2.3.4 Решение

Каждое преимущество G431 при проверке оказалось решением задачи, которой в изделии нет (таблица 2.9).

Таблица 2.9 — Преимущества G431 против потребностей изделия

Преимущество G431	Результат проверки
Два АЦП, одновременная выборка	цена одного АЦП $\sim 0,17$ дБ, худший случай (табл. 2.7)
Аппаратный оверсэмплинг	программное усреднение: 1,7% АЦП, доли % ядра
CORDIC (atan2)	при 2 кГц программный atan2f — доли % ядра (гл. 2.5)
FMAC (КИХ-фильтры)	дециматор 644 тыс. умножений/с — менее 1% ядра
170 МГц против 100	итоговая загрузка $\sim 2\%$ (гл. 2.5)

Единственный параметр, по которому G431 объективно уступает, — ОЗУ (32 КБ против 128 КБ). Буферы обработки ($\sim 1,6$ КБ, гл. 2.5) умещаются в оба, поэтому и он спора не решает. Выбран **STM32F411**: при равном результате — вчетверо больше памяти, ниже цена, шире доступность (плата WeAct Black Pill). G431 остаётся обоснованной заменой на случай смены модуля на образец с точной квадратурой — тогда довод о двух АЦП обретёт силу.

2.3.5 Проверка

Расчёты главы закреплены тестами (tests/test_adc.py [3]): перекося, ошибка фазы, сложение подавлений в худшем случае по фазе (цена одного АЦП $\approx 0,17$ дБ), шум квантования по (2.8)–(2.9), правило разрядов передискретизации, бюджет ОЗУ обоих кандидатов. Паспортные числа кандидатов сверены с [4, 5]. Не проверено расчётом и отнесено к испытаниям на железе: джиттер запуска АЦП от таймера (случаен, поворотом фазы не компенсируется); реальные ENOB, шум опоры, нелинейности АЦП и достаточность дитеринга для передискретизации; связь подавления зеркального канала с вероятностью ошибки направления.

Ссылки главы: [1] паспорт K-LC2, [3] репозиторий, [4] STM32F411, [5] STM32G431, [6] AN2668 (передискретизация), [9] Boric-Lubecke et al., [10] Droitcour (image rejection), [14] Kester (квантование).

2.4 Схема электрическая

2.4.1 Схема как порождаемый артефакт

Принципиальная схема изделия выполнена в САПР KiCad [20]. Особенность принятого процесса: схема не рисуется вручную, а генерируется скриптом (kicad/gen_schematic.py [3]) из той же описанной кодом топологии, которая верифицирована симулятором в главе 2.2.

Обоснование. Ручная перерисовка проверенного нетлиста создала бы в проекте вторую, независимую от первой, запись топологии, и их тождественность держалась бы только на аккуратности исполнителя — типовой источник ошибок переноса. Генерация исключает сам класс ошибки: символы и координаты их выводов читаются из штатных библиотек САПР, соединения строятся по топологии, идентификаторы детерминированы

(повторная генерация даёт файл, идентичный побайтно, что делает осмысленным контроль версий).

2.4.2 Отличия схемы от симуляционной модели

Симуляция главы 2.2 оперирует идеальностями, которые в изделии должны быть построены явно. Различия сведены в таблицу 2.10.

Таблица 2.10 — От модели к схеме

В симуляции	В схеме	Причина
Идеальный источник 1,65 В	Делитель 10 кОм/10 кОм с буфером на ОУ	через резисторы обратной связи 1 кОм течёт сигнальный ток; небуференная опора (5 кОм) изменила бы усиление и связала каналы
Один канал	Два зеркальных канала I и Q	требование симметрии (п. 2.1.6)
—	Развязка 100 нФ на корпус, 10 мкФ на шину	подавление помех питания у модуля 25 дБ [1]
—	Незанятый ОУ — повторителем на опору	висящий вход КМОП-усилителя недопустим [12]
—	Разъёмы модуля и отладочной платы	физические интерфейсы

Применён сдвоенный ОРА2388 [2]: два канала по два каскада занимают ровно два корпуса, третий корпус — буфер опоры; единая позиция закупки. Допуски элементов проставлены в полях схемы: резисторы усиления 0,1%, конденсаторы фильтров 1% (п. 2.1.6).

2.4.3 Верификация схемы

Проверка схемы «глазами» отвергнута принципиально: чтение собственной схемы подвержено ошибке подтверждения — глаз видит ожидаемое. Приняты три машинные проверки (tests/test_schematic.py [3]).

1. **Обратная выгрузка списка цепей.** Из готового файла схемы средствами

САПР (kicad-cli) экспортируется список цепей, и разбиение всех выводов всех компонентов по цепям сверяется с эталонным, записанным в тесте вручную и независимо от генератора. Проверены все 20 цепей, 79 выводов — повыводно. Тем самым доказано: схема, которую увидит человек, и топология, которую проверил симулятор, — один и тот же объект.

2. Контроль правил (ERC) штатным средством САПР: ноль ошибок, ноль

предупреждений, включая сверку кэша символов с библиотеками.

3. Детерминизм. Файл схемы в репозитории обязан совпадать с текущим

выводом генератора; ручная правка файла или рассинхронизация генератора обнаруживаются тестом.

2.4.4 Ограничения

Схема выполнена в нотации библиотек KiCad, не по ЕСКД; для оформления листа ЭЗ по [25] требуется замена библиотеки условных графических обозначений (генератор допускает это без изменения топологии) и основная надпись по ГОСТ 2.104. Печатная плата не разводилась — проект остановлен на уровне схемы сознательно (гл. 3.1: требования к монтажу, включая чистоту поверхности у резисторов 10 МОм, вынесены в методику сборки). Номиналы 9 кОм и 19 кОм при закупке заменяются ближайшими из ряда E96 — 9,09 и 19,1 кОм (усиление 202,9; поправка вносится в константы прошивки).

2.4.5 Проверка

Глава закреплена шестью тестами (детерминизм, повыводная сверка цепей, ERC) [3]; регенерация схемы, экспорт цепей, контроль правил и рендер изображения выполняются командой `make schematic`.

Изображение схемы — рисунок 2.1 (приложение), нетлист — kicad/frontend.net [3].

Ссылки главы: [1] паспорт K-LC2, [2] паспорт ОРА2388, [3] репозиторий, [12] Хоровиц и Хилл, [20] KiCad, [25] ЕСКД.

2.5 Программа обработки сигналов

2.5.1 Архитектура и переносимость

Ядро обработки написано на переносимом Си без зависимостей от периферии микроконтроллера (firmware/core [3]). Единый исходный текст компилируется двумя инструментами: arm-none-eabi-gcc — под целевой Cortex-M4F, и хост-компилятором — под инструментальную машину, где ядро прогоняется на сценариях физической модели главы 1.2. Так замыкается главный контур проверки работы: **прошивка принимает решения на тех же сигналах, на которых валидирована физика**, до появления железа.

Конвейер обработки (рисунок 2.2):

20 кГц I/Q → КИХ-дециматор $\div 10$ → 2 кГц → вычитатель постоянной

→ ветвь движения: ФВЧ 5 Гц (биквад) → ворота по энергии →

набег фазы → дискриминатор смещения 0,25 м

→ ветвь дыхания: банк Гёрцеля 0,20–0,59 Гц (окно 10,24 с)

→ удержание присутствия

2.5.2 Дециматор

Требования к прореживающему фильтру выведены в гл. 2.3: полоса до 500 Гц без искажений, подавление зон наложения (выше 1 кГц нового Найквиста) не хуже 55 дБ, линейная фаза — на фазе держится знак направления. Выбран симметричный КИХ-фильтр 160-го порядка (161

коэффициент) с окном Кайзера [15, 16]; достигнутые характеристики: неравномерность в полосе 0,01 дБ, подавление 60,5 дБ.

Расчёт коэффициентов оформлен самопроверяющимся скриптом (firmware/tools/design_fir.py [3]): скрипт вычисляет АЧХ спроектированного фильтра и отказывается генерировать таблицу коэффициентов, если спецификация не выдержана; достигнутые числа впечатываются в заголовок таблицы. АЧХ скомпилированного фильтра дополнительно сверена с расчётом пропусканием тестовых тонов через собранное ядро (п. 2.5.6).

Вычислительная стоимость: $161 \text{ умножение на выходной отсчёт} \times 2 \text{ канала} \times 2 \text{ кГц} = 644 \text{ тыс. операций/с}$ — менее 1% ядра при 100 МГц.

2.5.3 Движение: набег фазы вместо спектра

В плане работы значился выбор «БПФ или алгоритм Гёрцеля» для спектральной оценки движения. Анализ показал, что для движения не нужен ни тот, ни другой. Знак доплеровского сдвига содержится в производной фазы комплексного сигнала, а дискриминатору (п. 2.5.5) нужно смещение цели — интеграл скорости, то есть непосредственно набег фазы, умноженный на $\lambda/4\pi = 0,989 \text{ мм/рад}$. Прямое накопление разворачиваемой фазы даёт смещение без спектральных буферов вовсе (нулевая дополнительная память против ~8 КБ на кадры БПФ) и без спектрального разрешения, которое здесь нечем занять.

Ворота по энергии открывают накопление: полоса движения выделяется биквадратным ФВЧ Баттерворта 5 Гц второго порядка, мощность сглаживается за 50 мс, порог снабжён дебаунсом 25/200 мс (открытие/закрытие). Второй порядок фильтра принципиален — обоснование в п. 2.5.7.

2.5.4 Дыхание: банк Гёрцеля

Дыхание — узкополосный процесс 0,2–0,6 Гц (12–35 циклов в минуту) при почти неподвижной цели. Для пяти фиксированных частотных точек полный БПФ избыточен; применён алгоритм Гёрцеля [17]: рекурсивное накопление с двумя числами состояния на частотную точку. Окно 20 480 отсчётов (10,24 с) даёт шаг сетки 0,098 Гц; точки 2–6 покрывают диапазон, точка 1 (0,098 Гц) исключена как смежная с остатком постоянной составляющей. Энергия считается по обоим каналам и складывается — направление колебаний груди безразлично. Память состояния банка — 20 чисел; окно нигде не хранится.

2.5.5 Дискриминатор возврата на место

Пороговая идея дипломного проекта 2020 года (гл. 1.4) — отличать перемещение от качания — реализована исполняемым правилом. Во избежание двусмысленности разведены четыре различные сущности: непрерывно вычисляемое смещение, однократное событие, реакция на возврат цели и таймер удержания состояния.

Смещение есть накопленный разворачиваемый (unwrap) набег фазы, умноженный на $\lambda/4\pi$: величина знаковая и непрерывная, растущая, пока цель движется в одну сторону, и убывающая при движении обратно. Само по себе смещение — не решение, а лишь наблюдаемая.

Событие движения выносится, когда модуль смещения впервые за время открытых ворот превышает 0,25 м. Порог отделяет перемещение человека (идуший за 0,25 с при 1 м/с проходит порог) от качания предмета вокруг своего места (листва, штора: размах не достигает 0,25 м, смещение колеблется в пределах порога и события не даёт). Знак смещения в момент события задаёт направление: минус — приближение (дальность убывает,

фаза растёт). Различимость знака — прямое следствие квадратурного приёма (гл. 1.2, [9, 18]).

Возврат цели на место (последующая убыль смещения) присутствия не отменяет: однажды вынесенное событие движения не отзывается, обратный ход фазы лишь прекращает рост смещения. Отбраковка качания достигается не отменой события, а тем, что у качания порог не достигается изначально.

Удержание реализовано таймером: продолжающееся квалифицированное движение либо подтверждённое дыхание перезаряжает его на заданный интервал; по истечении интервала без подтверждений состояние переходит в «пусто». Перезарядка именно квалифицированным движением, а не любой активностью ворот, принципиальна: непрерывно идущий человек удерживается всё время движения, тогда как качание предмета, не берущее порог, присутствия не продлевает (без этого различия непрерывно идущий пропадал бы через интервал удержания после первого же пересечения порога — дефект, найденный исполнением). Тем самым «занято» не является перманентным: на сценарии «человек прошёл мимо и ушёл» движение набирает смещение свыше 0,25 м, фиксирует «занято», а спустя интервал удержания после того, как движение стихло, состояние честно гаснет. Этот композитный сценарий и обратный случай — уход цели на место не отменяет уже вынесенного присутствия — закреплены тестами (п. 2.5.6).

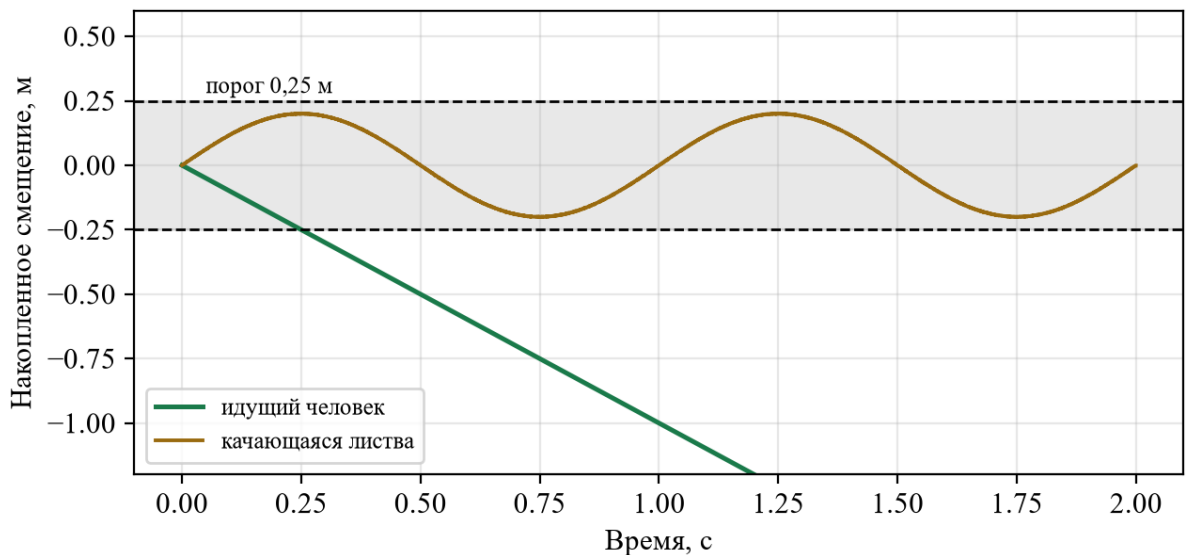


Рисунок 5 — Дискриминатор: человек уходит с места, качающийся предмет возвращается

2.5.6 Верификация на сценариях модели

Хостовая сборка ядра (обвязка `firmware/host/sim.c` [3]) принимает поток пар I/Q и печатает события. Тестовый набор (`tests/test_firmware.py` [3], 17 тестов) генерирует сценарии физической моделью главы 1.2 — с той же несущей, тем же радарным уравнением — и проверяет решения:

- дышащий неподвижный человек удерживает «занято» на модельном сигнале для

дальностей 1, 2 и 5 м, включая глубокое дыхание. Оговорка: это проверка алгоритма на идеализированном сигнале постоянной амплитуды, а не гарантия дальности — реальный запас по шуму в полосе дыхания на 5 м не установлен (гл. 1.3.4), поэтому в характеристиках изделия зона дыхания ограничена 1–3 м;

- идущий человек даёт событие движения со знаком направления; порог

срабатывает при наборе ровно 0,25 м пути (0,279 с при 1 м/с — физика сходится с точностью до дебаунса);

- «человек прошёл мимо и ушёл»: движение фиксирует «занято», а по истечении

удержания состояние гаснет в «пусто» — присутствие не перманентно;
— уход цели на 0,3 м и возврат на место: событие движения не отзывается,

присутствие удерживается — возврат его не отменяет;

— листва с размахом качания до 0,4 м, помеха светильника 100 Гц и пустая

комната не дают срабатываний;

— стартовая политика «включение = занято»: при встроенном умолчании пустая

комната при подаче питания держится «занято» и гаснет у отметки установления (~16 с); при отключённой политике молчит с первого отсчёта;

— удержание истекает в «пусто» в предсказанный момент;

— АЧХ дециматора: тон полосы проходит с усилением $1,00 \pm 0,01$, тон зоны

наложения давится более чем на 55 дБ;

— ядро компилируется под Cortex-M4F без предупреждений (кросс-компиляция —

часть тестового набора).

Модель качающегося предмета в сценариях — сильно идеализированная и её пределы надо назвать прямо. Это один точечный отражатель с одночастотным синусоидальным колебанием (размах до 0,4 м, частоты 0,1–2 Гц). Показанная отбраковка означает лишь, что для такого сигнала накопленное смещение не достигает порога 0,25 м. Она НЕ покрывает случаи, которые в реальности ведут себя иначе: несколько одновременно движущихся отражателей, вентилятор и штору, человека с мелкими движениями за столом на фоне помехи, статический многолучевой фон — в СВ-радаре сигналы всех отражателей складываются в один вектор, и поведение дискриминатора на такой сумме этими тестами не исследовано. Ошибочно было бы полагать, что широкополосность порыва ветра сама по себе снижает отклик: ворота открываются по полной энергии

высокочастотной ветви, а не по энергии отдельного спектрального бина. Поэтому вероятность ложной тревоги, вероятность обнаружения и дальность не могут быть заявлены до калибровки порогов в вольтах и статистических испытаний со множественными и хаотическими помехами на реальном сигнале (этап железа). Показанное здесь — необходимая, но не достаточная проверка: на одиночном детерминированном качании (0,4 м, 1 Гц) ложных срабатываний нет.

2.5.7 Два дефекта, найденные исполнением

Ценность хостовой верификации демонстрируют два дефекта, не видимые в статическом расчёте и найденные прогоном за минуты.

Сильное дыхание глушило само себя. Фазовая модуляция дыхания на малой дальности велика (2,5–6 рад), её гармоники достигают 1,5–2,4 Гц. Первоначальный однополюсный фильтр 5 Гц пропускал их в полосу движения; ворота открывались, и оценка дыхания подавлялась правилом «в окне было движение» — неподвижный человек на 1 м терялся. Исправление двойное: фильтр второго порядка (крутизна 40 дБ/дек против 20) и правило микро-качания — эпизод с набегом менее 2 см не считается движением для целей подавления дыхания, поскольку миллиметровое качание и есть подпись дыхания; листву (± 10 см) правило не спасает.

Хвост дыхания честно продлевает присутствие. Дыхание, оборвавшееся в начале окна Гёрцеля, всё равно набирает надпороговую энергию, и «пусто» наступает окном позже наивного ожидания. Дефектом оказался не детектор, а ожидание теста; поведение задокументировано как свойство.

2.5.8 Бюджет ресурсов и оставшееся

Итоговый бюджет STM32F411 (100 МГц): вычисления $\sim 2\%$ ядра (дециматор, биквады, $\text{atan}2f$, банк Гёрцеля), состояние конвейера 1,6 КБ ОЗУ

(1,2%), код ядра 2,1 КБ Flash (0,4%), АЦП 40 kSPS (1,7%). Запасы подтверждают выбор главы 2.3.

Не реализовано и отмечено явно: регистровый код захвата (АЦП в режиме сканирования, запуск от таймера, DMA в двойной буфер [7]) — написание без железа означало бы фиксацию непроверенного кода, что противоречит методике работы; интерфейс ядра к нему готов (`presence_push`). Пороги детектора выражены в единицах модели; пересчёт в вольты — процедура калибровки (гл. 3.1). Стартовая политика «включение = занято» на время установления тракта (гл. 2.1.7) реализована в ядре инициализацией таймера удержания при подаче питания и проверена на хосте (переход «занято → пусто» у отметки установления ~16 с); на железе остаётся подтвердить её на включении реального питания.

Ссылки главы: [3] репозиторий, [7] AN3116 (режимы АЦП), [9] Boric-Lubecke et al., [15] Оппенгейм и Шафер (КИХ, окно Кайзера), [16] Лайонс, [17] Goertzel, [18] Lyons (квадратура).

2.6 Единая модель тракта и статистический анализ

2.6.1 Зачем понадобилась ещё одна модель

Проверки предыдущих разделов имели общий пробел: алгоритмы прошивки (гл. 2.5) прогонялись на идеальной комплексной огибающей физической модели напрямую, минуя аналоговый тракт, шумы, разбаланс каналов и реальный АЦП. Такая проверка подтверждает работу алгоритма, но не отвечает на вопрос, что он увидит после настоящего тракта. Чтобы уменьшить этот разрыв, между физической моделью и прошивкой добавлена единая модель тракта и АЦП (`model/analog_chain.py` [3]).

Модель берёт идеальную огибающую сценария и по порядку добавляет: масштаб в вольты на выходе смесителя; статическое смещение ± 200 мВ; приведённый ко входу шум (белый от модуля и ОУ плюс

окрашенный ФНЧ шум резистора 10 МОм); сумму со статическим отражателем (многолучёвость); аналоговый ФВЧ 0,048 Гц с пусковым переходником; усиление 200 с насыщением о шины питания; разбаланс I/Q по амплитуде и фазе; последовательную выборку каналов с перекосом; и 12-разрядный АЦП с конечным эффективным охватом (ENOB), шумом опоры и дитерингом. Всё детерминировано зерном датчика случайных чисел, что и позволяет статистический анализ (п. 2.6.3).

2.6.2 Что показывает модель

Проверено, что модель воспроизводит уже выведенные ранее факты, а не подгоняет их (7 тестов, tests/test_analog_chain.py [3]):

- разделительный ФВЧ снимает смещение; при этом его остаточный хвост

усиливается вместе с сигналом в 200 раз, поэтому до пренебрежимого уровня на входе АЦП установление длится дольше номинальных 16 с — уточнение к п. 2.1.7, дополнительно оправдывающее стартовую политику «включение = занято»;

- крупная ближняя цель на установившемся тракте упирается в шины питания —

подтверждение предела динамического диапазона (п. 2.1.5);

- разбаланс квадратуры 10° даёт конечное подавление зеркального канала около

21 дБ — то же число, что в гл. 1.2, но полученное динамически;

- приведённый ко входу шум в полосе дыхания выше шума одного модуля —

подтверждение доминирования резистора 10 МОм (гл. 2.1);

- шум АЦП при ENOB порядка 10,5 разряда, приведённый ко входу, оказывается

сопоставим с аналоговым шумом тракта — иллюстрация того, почему реальный ENOB нельзя игнорировать (оговорка п. 2.3.3).

2.6.3 Статистический анализ

Отдельные сценарии не дают ни вероятности обнаружения, ни вероятности ложной тревоги. Модель Монте-Карло (model/montecarlo.py [3]) прогоняет сотни реализаций, в каждой случайно разбрасывая параметры, которые в реальности не фиксированы: ЭПР цели (± 10 дБ), долю ЭПР, реально модулируемую грудной клеткой, разбаланс I/Q, смещение по каналам, статический отражатель многолучёвости, ENOB АЦП и зерно шума. Метрики: вероятность обнаружения дыхания P_d (по отношению сигнал/шум в полосе дыхания) и вероятность ложной тревоги P_{fa} (по превышению порога смещения 0,25 м на качании листвы).

Таблица 2.11 — Обнаружение дыхания по модели (100 реализаций на дальность)

Дальность	P_d (ОСШ > 10 дБ)	ОСШ дыхания, дБ (10 / 50 / 90 проц.)
1 м	1,00	32 / 40 / 47
2 м	0,93	13 / 29 / 40
3 м	0,70	7 / 14 / 32

Результат согласуется с расчётом гл. 1.3 и, что важнее, честно показывает границу: на 3 м десятый процентиль отношения сигнал/шум опускается ниже порога обнаружения — при неблагоприятном сочетании ЭПР, ракурса и разбаланса дыхание на такой дальности теряется. Это статистическое основание того, почему зона уверенного дыхания ограничена 1–3 м, а её верхняя граница объявлена ненадёжной. Ложных тревог на модельной листве метод практически не даёт (P_{fa} близко к нулю).

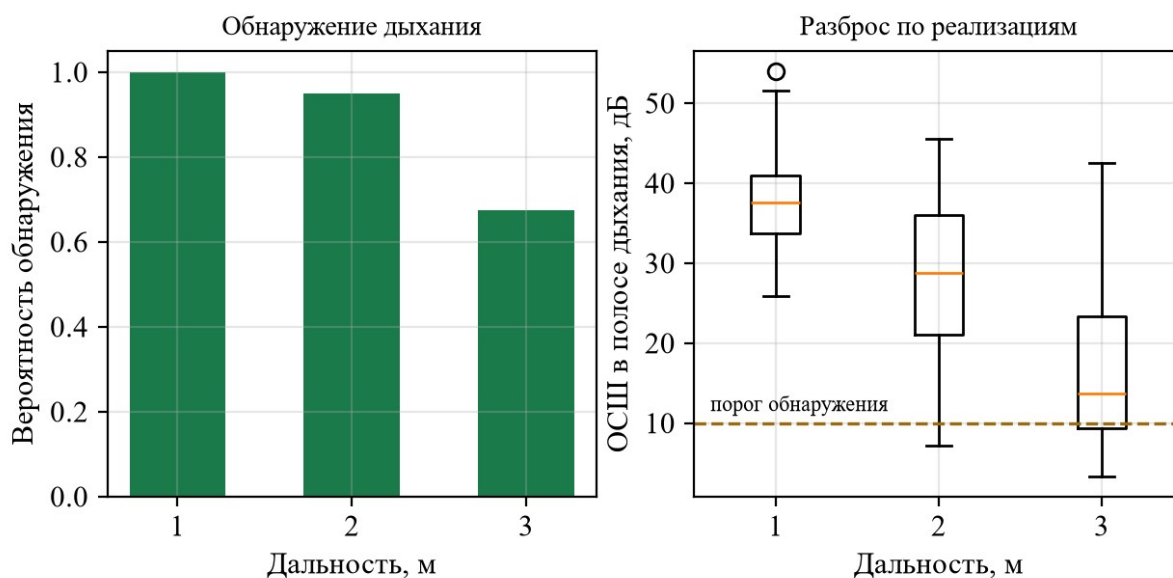


Рисунок 6 — Статистика обнаружения дыхания: вероятность и разброс по дальности

2.6.4 Границы

Сделанное уменьшает разрыв между расчётом и изделием, но не устраняет его. Во-первых, это по-прежнему модель: числа P_d и P_{fa} — свойство модели с принятыми диапазонами разброса, а не измеренные характеристики. Во-вторых, модель листвы остаётся одиночным отражателем; многоцелевые и хаотические помехи (несколько движущихся объектов, вентилятор, штора, человек за столом на фоне помехи) статистикой не охвачены. Поэтому вероятности обнаружения и ложных тревог как характеристики изделия по-прежнему требуют записи реального сигнала с модуля K-LC2 и статистических испытаний на нём (заключение). Роль этого раздела — не заменить измерения, а показать методом, где у конструкции узкие места, и подготовить процедуру, в которую подставляются реальные данные.

2.6.5 Проверка

Модель тракта и статистический анализ закреплены 10 тестами (tests/test_analog_chain.py, tests/test_montecarlo.py [3]); прогон статистики —

команда `make montecarlo`. Тесты проверяют не точные значения P_d/P_{fa} , а физически ожидаемые тенденции: воспроизведение известных фактов трактом и убывание обнаружения дыхания с дальностью.

Ссылки главы: [3] репозиторий (model/analog_chain.py, model/montecarlo.py), [14] Kester (шум квантования, ENOB).

3.1 Экономическое обоснование

3.1.1 Себестоимость

Смета прототипа составлена по розничным ценам июля 2026 года (полный перечень с позициями поставщиков — docs/07 репозитория [3]) и сведена в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Смета прототипа

Статья	Стоимость, Р
Радарный модуль K-LC2	1500–2500
Операционные усилители ОРА2388, 3 шт.	900–1800
Отладочная плата STM32F411 (Black Pill)	500–700
Пассивные компоненты (в т.ч. прецизионные 0,1%)	300–500
Стабилизатор, макетная плата, разъёмы	500–800
Итого прототип	3700–6300, медиана $\approx$ 4500

Половину стоимости составляет радарный модуль. Оценка серийной себестоимости (партия от 100 шт.: модуль по оптовой цене, ОУ и пассив с ленты, печатная плата вместо макетной) — 1800–2500 Р без корпуса и монтажа. Оценка консервативна: замена модуля на более массовый аналог с квадратурным выходом способна снизить её дальше, но выходит за рамки работы.

3.1.2 Положение на рынке

Таблица 3.2 — Сравнение с альтернативами

Изделие	Цена	Видит неподвижного	Тракт
PIR-датчик (бытовой)	300–700 Р	нет	закрыт
HLK-LD2410 (FMCW 24 ГГц)	~500 Р (\$5)	да	закрыт: вердикт по UART
Данное изделие (серия)	1800–2500 Р	да	открыт: сырой I/Q, пороги, исходники

Честная констатация: как готовый массовый продукт изделие проигрывает LD2410 по цене при сопоставимой функции — внутри LD2410 архитектура FMCW с дальностными стробами, недостижимая в данном бюджете разработки. Обоснованные ниши изделия иные: (а) применения, требующие открытого тракта — настройка порогов под помещение, доступ к сырому сигналу, перспектива съёма частоты дыхания; (б) учебная и исследовательская платформа — каждый узел документирован и верифицируем; (в) независимость от единственного поставщика вердикта. Экономический расчёт далее выполняется для функции «датчик занятости» безотносительно исполнения.

3.1.3 Методика и расчёт окупаемости

Экономический эффект датчика занятости — сокращение времени горения освещения в отсутствие людей. Приняты допущения (таблица 3.3); все они варьируются в п. 3.1.4.

Таблица 3.3 — Допущения расчёта

Параметр	Значение	Основание
Помещение	кабинет 15 м²	типовое рабочее место
Мощность освещения	150 Вт	светодиодное, 10 Вт/м² при нормах [23]
Присутствие людей	6,5 ч/день	8-часовой день минус перерывы и встречи
Уходов из помещения	4/день	перерывы, обед, встречи
Рабочих дней	250/год	производственный календарь
Тариф	8 Р/кВт·ч	одноставочный коммерческий, середина 2026

Ключевой параметр сравнения — таймаут выключения. Для PIR-датчика таймаут менее 15–20 минут на практике неприемлем: неподвижный сидящий человек перестаёт обнаруживаться, свет гаснет на работающем, и датчик либо переводится на длинный таймаут, либо отключается вовсе (гл. 1.1). Радарный датчик, удерживающий присутствие по дыханию, допускает таймаут в 1 минуту без ложных отключений — в этом и состоит монетизируемое отличие.

Сценарии годового потребления (кабинет из табл. 3.3):

C0 — датчика нет (или PIR отключён после жалоб): свет горит рабочий день, 11 ч: 1,65 кВт·ч/день, **412 кВт·ч/год**.

C1 — PIR, таймаут 20 мин: свет = присутствие 6,5 ч + 4 ухода × 20 мин = 7,8 ч: 1,17 кВт·ч/день, **293 кВт·ч/год**.

C2 — радарный датчик, таймаут 1 мин: свет = 6,5 ч + 4 × 1 мин ≈ 6,6 ч: 0,98 кВт·ч/день, **246 кВт·ч/год**.

Таблица 3.4 — Эффект и окупаемость (тариф 8 Р/кВт·ч)

Переход	Экономия, кВт·ч/год	Экономия, Р/год	Окупаемость серийного (2200 Р)
C0 → C2 (PIR был отключён)	166	1330	1,7 года
C1 → C2 (PIR работал)	47	376	5,9 года

3.1.4 Анализ чувствительности и честный вывод

Расчёт устойчив к допущениям в главном выводе и неустойчив в частном. Экономия перехода $C1 \rightarrow C2$ пропорциональна мощности света и числу уходов: даже удвоение обоих (300 Вт, 8 уходов) даёт окупаемость $\sim 1,5$ года — на грани разумного для замены работающего датчика. Экономия $C0 \rightarrow C2$ линейна по мощности: для коридора или опенспейса с освещением 0,5–1 кВт окупаемость сокращается до месяцев.

Вывод осторожный. Замена исправно работающего PIR-датчика радарным экономически не обоснована (5,9 года при сроке службы светильников того же порядка). Более оправданная ниша — помещения, где PIR фактически не работает: сидячие рабочие места, переговорные, читальные залы, где ложные отключения на неподвижных людях привели к длинным таймаутам или отключению автоматики. Там радарный датчик возвращает автоматику в строй.

Важная оговорка о характере расчёта. В окупаемости использована цена установленного изделия 2200 Р, тогда как эта величина — оценка себестоимости компонентов без корпуса, платы, монтажа и тестирования, без источника питания и исполнительного выхода (реле), без установки, сертификации, гарантийного резерва, а также без учёта собственного энергопотребления и возможных ложных включений. С полной стоимостью установленного изделия сроки окупаемости вырастут. Поэтому приведённые числа следует понимать как сценарную оценку потенциальной экономии электроэнергии, а не как расчёт окупаемости готового продукта. Не монетизирован и второй эффект — устранение эпизодов «свет погас на сидящем человеке», из-за которых автоматику и отключают вовсе.

3.1.5 Проверка

Смета: цены зафиксированы снимком июля 2026 с указанием поставщиков (docs/07 [3]); пересчёт — замена цен в одной таблице. Расчёт окупаемости: все допущения объявлены (табл. 3.3), формулы сводятся к произведениям и воспроизводятся подстановкой; вариации допущений рассмотрены в п. 3.1.4. Числа сравнения с альтернативами — розничные цены торговых площадок на дату снимка [3].

Ссылки главы: [3] репозиторий (docs/07 — смета с позициями), [23] СП 52.13330.2016 (нормы освещённости — обоснование удельной мощности).

3.2 Безопасность

Раздел охватывает три контура: электромагнитную безопасность изделия для людей, правовой режим использования радиочастоты и безопасность изготовления и наладки.

3.2.1 Электромагнитная безопасность

Изделие непрерывно излучает на частоте 24,125 ГГц. Излучение неионизирующее; глубина проникновения поля этой частоты в ткани — доли миллиметра, нормируемый фактор — плотность потока энергии (ППЭ).

Действующий норматив — СанПиН 1.2.3685-21 [21]: для населения в диапазоне 0,3–300 ГГц предельно допустимая ППЭ составляет **10 мкВт/см²** (таблица 5.42 норматива).

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность модуля (ЭИИМ) по паспорту — 15 дБм = 32 мВт [1]. Оценка ППЭ сверху — вся мощность через сферу радиуса R (в максимуме луча поток определяется именно ЭИИМ):

$$\text{ППЭ}(R) = \text{ЭИИМ} / (4\pi R^2). \quad (3.1)$$

Таблица 3.5 — ППЭ изделия против норматива

Расстояние	ППЭ	Отношение к ПДУ 10 мкВт/см ²
0,1 м	≈ 25 мкВт/см ²	превышает в 2,5 раза
0,16 м	≈ 10 мкВт/см ²	предел достигается
0,2 м	6,3 мкВт/см ²	запас 1,6 раза
0,5 м	1,0 мкВт/см ²	запас 10 раз
1 м (ближняя граница рабочей зоны)	0,25 мкВт/см ²	запас 40 раз
2 м (типовая дальность)	0,06 мкВт/см ²	запас 160 раз

По оценке (3.1) норматив достигается на расстоянии около 0,16 м: ближе к антенне расчётная ППЭ превышает ПДУ, дальше — падает с запасом. Поэтому корректный вывод осторожный: **при гарантированном расстоянии не менее 0,2 м расчётная ППЭ ниже норматива**, а во всей рабочей зоне (от 1 м) запас составляет полтора-два порядка. Датчик монтируется на потолке или стене, вне зоны непосредственного контакта, так что рабочее расстояние заведомо больше 0,2 м. Две оговорки: формула (3.1) — дальнеполевая оценка, у самой антенны (граница ближней зоны) она неприменима и требует отдельной проверки или измерения; и она берёт полную ЭИИМ в максимуме луча. Для сопоставления порядка величины: ЭИИМ изделия (32 мВт) втрое ниже типовой ЭИИМ бытовой точки доступа Wi-Fi класса 100 мВт.

Расчёт (3.1) и запасы таблицы 3.5 закреплены автоматическими тестами (tests/test_frontend.py, класс TestEmissionSafety [3]).

3.2.2 Правовой режим радиочастоты

Использование полосы регулируется решением ГКРЧ от 07.05.2007 № 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия» (в действующей редакции) [22]. Приложение 7 решения выделяет полосу **24,05–24,25 ГГц** устройствам для обнаружения передвижения и радиосигнализации с ограничением максимальной ЭИИМ **100 мВт**; такие

устройства используются без оформления отдельных разрешений и без регистрации РЭС.

Соответствие изделия: несущая 24,125 ГГц — внутри полосы; ЭИИМ 32 мВт — втрое ниже ограничения (закреплено тестом [3]). Требования электромагнитной совместимости для категории УМРД установлены ГОСТ Р 52459.3-2009 [26]; их инструментальная проверка возможна только на изготовленном образце и отнесена к испытаниям.

3.2.3 Электробезопасность изделия

Изделие целиком питается напряжением 5 В и 3,3 В (безопасное сверхнизкое напряжение, класс III по ГОСТ 12.2.007.0): гальванической связи с сетью нет, опасные напряжения в схеме отсутствуют. Сетевой адаптер — покупной сертифицированный; собственных сетевых цепей изделие не содержит. Подвижных и нагревающихся частей нет.

Отдельно отмечено свойство, существенное для применения: датчик не содержит камеры и не формирует изображений. В отличие от видеоаналитики присутствия, изделие принципиально не создаёт персональных данных — выходной сигнал сводится к состоянию «занято/пусто» и служебным событиям.

3.2.4 Безопасность изготовления и наладки

Опасные и вредные факторы техпроцесса (пайка, отмывка, наладка) и меры защиты сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 — Факторы изготовления и меры

Фактор	Источник	Мера
Аэрозоли канифоли и флюсов	пайка	местная вытяжка или проветриваемое место; бессвинцовый припой предпочтителен
Ожоги	жало 300–350 °С	подставка, не паять «на весу»
Пары изопропанола	отмывка плат	ЛВЖ: проветривание, вдали от нагревателей
Электростатика	КМОП (ОУ, МК)	браслет либо касание заземлённой поверхности перед монтажом; повреждение ЭСР — риск для изделия, не для человека
Зрительное напряжение	монтаж SMD	освещённость рабочего места не ниже 500 лк [23]; лупа или микроскоп для контроля пайки

Наладка ведётся при питании от лабораторного источника или USB (5 В); поражение электрическим током исключено классом напряжения. Специфический для данной схемы пункт — контроль чистоты отмывки у высокоомных цепей (10 МОм): фактор не безопасности, но работоспособности (п. 2.1.4), и включён в методику наладки.

3.2.5 Проверка

Численные утверждения раздела — ППЭ по дальностям, запас 40× на границе рабочей зоны, непревышение ПДУ на 0,2 м, трёхкратный запас к лимиту ГКРЧ — вычисляются из паспортной ЭИИМ функцией `power_flux_density_w_m2` модели и закреплены тестами (`tests/test_frontend.py::TestEmissionSafety` [3]). Первоисточники нормативов приложены к работе в полнотекстовом виде: СанПиН [21] — официальное опубликование, решение ГКРЧ [22] — текст с портала регулятора с оговоркой о редакции (реквизиты действующей редакции сверены отдельно), ГОСТ Р 52459.3 [26] — по ссылке решения.

Ссылки главы: [1] паспорт K-LC2 (ЭИИМ), [3] репозиторий (тесты запасов), [21] СанПиН 1.2.3685-21 табл. 5.42, [22] решение ГКРЧ 07-20-03-001 прил. 7, [23] СП 52.13330.2016, [26] ГОСТ Р 52459.3-2009.

Заключение

Все девять задач, поставленных во введении, выполнены; сводка главных результатов с их численными выражениями приведена ниже.

1. Из восьми методов обнаружения присутствия выбран квадратурный CW-доплер как единственный, дающий физический признак неподвижного человека на дальности помещения при низкой стоимости и без формирования изображений; проигрыш FMCW по возможностям зафиксирован и обоснованно принят (гл. 1.1, 3.1).

2. Построена исполняемая модель квадратурного приёма. Доказано — тестом,

а не ссылкой на литературу, — что одноканальный приёмник не содержит информации о направлении; показано отсутствие нулевых точек у пары I/Q и вычислен потолок подавления зеркального канала 21,2 дБ из паспортной квадратуры $\pm 10^\circ$ (гл. 1.2).

3. Энергетический расчёт установил: радиолиния не является узким местом

(запас 40–56 дБ над шумом модуля); действительные ограничения — смещение смесителя, 476-кратно превышающее сигнал, фликкер-шум в полосе дыхания, динамический диапазон 28 дБ и чистота питания 0,75 мВ (гл. 1.3).

4. Разбор работы 2020 года выявил две ошибки класса согласованности;

идея дискриминатора «возврата на место» из той работы признана верной и доведена до реализации, впервые — на аппаратуре, физически способной её исполнить (гл. 1.4, 2.5).

5. Спроектирован тракт усиления 200 со срезом 0,048 Гц: смещение

снимается до усиления, полоса дыхания сохраняется с потерей не более 3%. Тракт верифицирован независимым схемотехническим моделированием: подавление смещения полное (1,650000 В на входе ОУ при +200 мВ на входе тракта), расхождение АЧХ с расчётом менее 2% (гл. 2.1–2.2).

6. Показано, что для данного изделия учебное требование двух АЦП можно

ослабить (цена одного АЦП около 0,17 дБ в худшем случае), а «очевидная» дискретизация 2 кГц неудачна (квантование громче тракта на 3,8 дБ для идеального АЦП); принята передискретизация 20 кГц. Выбран STM32F411; преимущества альтернативы G431 сведены к задачам, отсутствующим в изделии (гл. 2.3).

7. Принципиальная схема порождается из верифицированной топологии;

тождественность схемы и модели доказана обратной выгрузкой цепей (20 цепей, 79 выводов, повыводно), ERC чист (гл. 2.4).

8. Ядро обработки реализовано на переносимом Си (2,1 КБ кода, 1,6 КБ ОЗУ,

~2% загрузки ядра): КИХ-дециматор с подавлением 60,5 дБ и линейной фазой, детекция движения по накопленному набегу фазы без спектрального анализа, банк Гёрцеля 0,2–0,6 Гц для дыхания, дискриминатор 0,25 м. Проверка на сценариях физической модели (17 тестов): на идеализированном сигнале дышащий человек удерживает «занято» (зона изделия по физике ограничена 1–3 м, гл. 1.3), листва с размахом до 0,4 м, помеха светильника и пустая комната не дают срабатываний, направление различается знаком; стартовая политика «включение = занято» и сценарий «прошёл мимо и ушёл» закреплены отдельно. Оговорка: это проверка алгоритмов на модельном сигнале, не статистика ложных тревог на реальных помехах. Исполнение обнаружило дефекты, невидимые в статическом расчёте (самоподавление сильного дыхания; потеря непрерывно идущего человека по истечении удержания), — все разобраны и закрыты (гл. 2.5).

9. Экономический и санитарный разделы даны с явными оговорками.

Замена

исправно работающего PIR не окупается (5,9 года); более оправданная ниша — помещения с фактически отключённым PIR. Приведённые сроки — сценарная оценка потенциальной экономии, а не окупаемость готового изделия: цена взята по себестоимости компонентов, без корпуса, монтажа, питания и исполнительного выхода (гл. 3.1). Безопасность: при расстоянии не менее 0,2 м расчётная ППЭ ниже ПДУ СанПиН (у самой антенны формула неприменима и требует проверки), ЭИИМ втрое ниже лимита ГКРЧ, работа без регистрации РЭС; изделие не создаёт изображений и персональных данных (гл. 3.2).

Что осталось за границей работы — перечень к этапу железа: изготовление макета по методике гл. 3.1 с контрольными точками; регистровый код захвата АЦП (интерфейс ядра готов); калибровка порогов в вольтах. Отдельно — измерения, без которых характеристики заявлять нельзя: шум в полосе дыхания (где, по расчёту, доминирует резистор смещения 10 МОм, а не модуль), эффективная ЭПР модулированной дыханием составляющей, реальные ENOB и нелинейности АЦП с достаточностью дитеринга, статистика ложных тревог при множественных и хаотических помехах, проверка ППЭ у границы ближней зоны, джиттер запуска АЦП. Также — замена поведенческой модели ОУ фирменной макромоделью и оформление листа ЭЗ по ЕСКД.

Методический итог. Основной результат — не доказательство работоспособности изделия (без макета оно недостижимо), а воспроизводимый расчётный проект, доведённый до состояния, в котором ключевые риски выявлены и названы до изготовления. Каждый расчёт существует в исполняемой форме и пересчитывается одной командой (make test): физика — тестами модели, тракт — независимым симулятором, схема — обратной выгрузкой цепей, алгоритмы — прогоном на сценариях, а между физической моделью и прошивкой встроена единая модель тракта и

АЦП, на которой считается статистика P_d/P_{fa} (гл. 2.6). Границу этой проверки важно назвать прямо: и единая модель остаётся моделью с принятыми диапазонами разброса, а не измерением. Поэтому дальности, вероятности обнаружения и ложных тревог, окупаемость и санитарные запасы у границы ближней зоны отнесены к испытаниям на реальном сигнале с K-LC2.

Тем не менее у сделанного есть самостоятельная ценность. Та же дисциплина сквозного исполнения обнаружила ошибки согласованности, оставшиеся незамеченными в работе 2020 года, и дважды — в собственной прошивке; для проекта, который предстоит довести до изготовления, это снижает риск найти архитектурную ошибку уже на макете.

Список использованных источников

1. K-LC2 Radar Transceiver : Datasheet, rev. 11.2022 / RFbeam Microwave GmbH. — URL: <https://rfbeam.ch/product/k-lc2-radar-transceiver/> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.

2. OPA388 Precision, Zero-Drift, Zero-Crossover, True Rail-to-Rail Operational Amplifier : Datasheet / Texas Instruments. — URL: <https://www.ti.com/product/OPA388> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.

3. Дьяков, Г. Presence-sensor : репозиторий проекта (расчётная модель, схема, прошивка, автоматические тесты) : коммит 0270cb7 / Г. Дьяков. — URL: <https://gitlab.com/analogue-design/presence-sensor> (дата обращения: 22.07.2026). — Текст : электронный.

4. STM32F411xC/xE : Datasheet ; RM0383 Reference Manual / STMicroelectronics. — URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f411.html> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.

5. STM32G431xB : Datasheet DS12589 / STMicroelectronics. — URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g431cb.pdf> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.
6. AN2668. Improving STM32 ADC resolution by oversampling : Application Note / STMicroelectronics. — Текст : электронный.
7. AN3116. STM32 ADC modes and their applications : Application Note / STMicroelectronics. — Текст : электронный.
8. Финкельштейн, М. И. Основы радиолокации : учебник для вузов / М. И. Финкельштейн. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Радио и связь, 1983. — Текст : непосредственный.
9. Doppler Radar Physiological Sensing / O. Boric-Lubecke, V. M. Lubecke, A. D. Droitcour [et al.]. — Hoboken : Wiley, 2016. — Текст : непосредственный.
10. Droitcour, A. D. Non-Contact Measurement of Heart and Respiration Rates with a Single-Chip Microwave Doppler Radar : PhD thesis / A. D. Droitcour. — Stanford : Stanford University, 2006. — Текст : электронный.
11. Li, C. Microwave Noncontact Motion Sensing and Analysis / C. Li, J. Lin. — Hoboken : Wiley, 2014. — Текст : непосредственный.
12. Horowitz, P. The Art of Electronics / P. Horowitz, W. Hill. — 3rd ed. — Cambridge : Cambridge University Press, 2015. — Текст : непосредственный.
13. Op Amp Applications Handbook / ed. by W. Jung. — Burlington : Newnes ; Analog Devices, 2005. — Текст : непосредственный.
14. The Data Conversion Handbook / ed. by W. Kester. — Burlington : Newnes ; Analog Devices, 2005. — Текст : непосредственный.
15. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. — Москва : Техносфера, 2012. — Текст : непосредственный.
16. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. — 2-е изд. — Москва : Бином-Пресс, 2006. — Текст : непосредственный.

17. Goertzel, G. An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series / G. Goertzel. — Текст : непосредственный // American Mathematical Monthly. — 1958. — Vol. 65, № 1. — P. 34–35.
18. Lyons, R. Quadrature Signals: Complex, But Not Complicated / R. Lyons. — URL: <https://www.dsprelated.com/showarticle/192.php> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.
19. Ngspice Circuit Simulator : User's Manual. — URL: <https://ngspice.sourceforge.io/> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.
20. KiCad EDA : Documentation. — URL: <https://docs.kicad.org/> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.
21. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : санитарные правила и нормы : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2 : в редакции от 24.12.2025. — Текст : электронный.
22. О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия : решение Государственной комиссии по радиочастотам от 07.05.2007 № 07-20-03-001 : в редакции от 27.09.2023. — Текст : электронный.
23. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение : свод правил : актуализированная редакция СНиП 23-05-95* : утверждён приказом Минстроя России от 07.11.2016 № 777/пр. — Москва : Минстрой России, 2016. — Текст : электронный.
24. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления : межгосударственный стандарт : введён в действие 01.07.2018. — Москва : Стандартинформ, 2017. — Текст : непосредственный.

25. Единая система конструкторской документации : ГОСТ 2.701-2008. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению ; ГОСТ 2.702-2011. Правила выполнения электрических схем ; ГОСТ 2.710-81. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах ; ГОСТ 2.728-74. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы ; ГОСТ 2.759-82. Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники ; ГОСТ 2.104-2006. Основные надписи. — Москва : Стандартинформ. — Текст : непосредственный.

26. ГОСТ Р 52459.3-2009. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства радиосвязи. Часть 3. Частные требования к устройствам малого радиуса действия, работающим на частотах от 9 кГц до 40 ГГц : национальный стандарт Российской Федерации. — Москва : Стандартинформ, 2010. — Текст : непосредственный.

27. IEEE 802.11bf. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems. Local and Metropolitan Area Networks. Amendment: WLAN Sensing / IEEE Standards Association. — Текст : электронный.

28. mmWave radar sensors : техническая документация / Texas Instruments. — URL: <https://www.ti.com/sensors/mmwave-radar/overview.html> (дата обращения: 20.07.2026). — Текст : электронный.

29. Дьяков, Г. Радиосистема охраны периметра аэропорта с СВЧ датчиками движения : выпускная квалификационная работа / Г. Дьяков. — Санкт-Петербург : ГУАП, 2020. — Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное) Репозиторий работы

Все расчёты, модели, схема и прошивка, на которые ссылается записка, опубликованы в репозитории; каждое численное утверждение работы

воспроизводится из него одной командой. Листинги в приложение не выносятся намеренно: перепечатка кода в записку создала бы вторую, расходящуюся со временем копию — вместо неё дана ссылка на версию с фиксированным коммитом.

Адрес: <https://gitlab.com/analogue-design/presence-sensor> Состояние, описанное в записке: коммит 0270cb7 (93 автоматических теста).

А.1 Состав репозитория

Каталог, файл	Содержание	Глава
model/doppler.py	модель квадратурного приёма, радарное уравнение, набег фазы	1.2, 1.3
model/scenarios.py	сценарии: идущий, дышащий, листва, помеха светильника, пустая комната	1.2
model/frontend.py	паспортные данные К-LC2, расчёт тракта, шумовой бюджет, ППЭ	1.3, 2.1, 3.2
model/adc.py	перекос выборок, подавление зеркального канала, шум квантования	2.3
model/analog_chain.py	единая модель тракта и АЦП между физикой и прошивкой	2.6
model/montecarlo.py	статистика Pd/Pfa при разбросе параметров	2.6
spice/frontend.cir	нетлист тракта для ngspice (рабочая точка и АЧХ)	2.2
kicad/gen_schematic.py	генератор схемы из топологии; kicad/symlib.py — чтение библиотек	2.4
kicad/presence-sensor.kicad_sch	схема электрическая; kicad/frontend.net — выгруженный список цепей	2.4
firmware/core/	ядро обработки на переносимом C (presence.c/.h, таблица КИХ)	2.5
firmware/host/sim.c	хостовая обвязка ядра для прогона сценариев	2.5
firmware/tools/design_fir.py	расчёт КИХ-дециматора с самопроверкой спецификации	2.5

Каталог, файл	Содержание	Глава
tests/	автоматические тесты, см. А.3	все
docs/01–07	рабочие документы проекта, из которых выросли главы записки	все

А.2 Воспроизведение результатов

Требуется Python 3.11 и более новый. Внешние инструменты необязательны: при их отсутствии соответствующие тесты корректно пропускаются.

Команда	Что делает	Нужен инструмент
make install	установка зависимостей Python	—
make test	полный набор автоматических тестов	gcc, arm-none-eabi-gcc, kicad-cli (частично)
make spice	рабочая точка и АЧХ тракта	ngspice
make firmware	сборка ядра под хост и кросс-компиляция под Cortex-M4F	gcc, arm-none-eabi-gcc
make schematic	перегенерация схемы, выгрузка цепей, контроль правил ERC	KiCad 10
make montecarlo	статистика обнаружения и ложных тревог	—

А.3 Состав тестового набора

Файл	Тестов	Что закреплено
tests/test_frontend.py	31	энергетика радиолинии, шумовой бюджет (включая резистор 10 МОм), фильтры, согласование каналов, запасы к санитарным нормам
tests/test_firmware.py	17	решения детектора на сценариях модели, АЧХ дециматора, стартовая политика, кросс-компиляция под Cortex-M4F
tests/test_doppler.py	16	квадратурный приём, неразличимость направления одним каналом, нулевые точки
tests/test_adc.py	13	перекос выборок, подавление зеркального канала, шум квантования, бюджет ОЗУ
tests/test_analog_chain.py	7	единая модель тракта: снятие смещения, насыщение, разбаланс I/Q, окраска шума, квантование
tests/test_schematic.py	6	детерминизм генерации схемы, повыводная сверка цепей, чистый ERC
tests/test_montecarlo.py	3	тенденции статистики: убывание обнаружения с дальностью, низкая ложная тревога
Итого	93	

А.4 Замечание о границах

Тесты подтверждают внутреннюю согласованность расчётов и работу алгоритмов на сигналах модели. Они не заменяют измерений: в репозитории нет записей реального сигнала с модуля K-LC2, а модель тракта (А.1, model/analog_chain.py) остаётся моделью с принятыми диапазонами разброса.

Перечень того, что подлежит проверке на изготовленном образце, приведён в заключении.