

О построении датчика движения большой дальности на основе 24-ГГц модуля K-LC6 фирмы RFBeam

Константин ГОРБАТОВ
kvg@efo.ru

Модули датчиков движения для диапазона ISM (Instrumentation Scientific Medicine) 24,05–24,25 ГГц выпускаются такими фирмами, как RFBeam (Швейцария), InnoSent (Германия) и Microwave Solutions (Великобритания). С помощью этих устройств легко решается задача обнаружения движущегося объекта на расстояниях в несколько метров. Применение же специальной обработки позволяет увеличить дальность примерно в 2–3 раза (до 30–40 м для K-LC6), а охраняемую площадь соответственно в 4–9 раз, что является уже более сложной инженерной задачей. О подходах к ее решению и пойдет речь в данной статье.

Радарные модули фирмы RFBeam уже рассматривались в статье [1]. Входящий в их число модуль K-LC6 [2] обладает привлекательным набором характеристик: удобная диаграмма направленности (ДН) $80 \times 12^\circ$, I/Q-выходы, температурный диапазон $-20 \dots +80^\circ\text{C}$, наличие перестройки по частоте ± 125 МГц и относительно невысокая стоимость. ПЧ у него заявлена как 50 МГц по уровню -3 дБ. Для сравнения: модуль MDU2430-3 фирмы Microwave Solutions имеет ДН $60 \times 18^\circ$, одиночный выход ПЧ, температурный диапазон $-10 \dots +55^\circ\text{C}$, но у него отсутствует перестройка по частоте. Модуль IPS-155 фирмы InnoSent характеризуется более широкой ДН $70 \times 36^\circ$, имеет I/Q-выходы, температурный диапазон составляет $-20 \dots +60^\circ\text{C}$, перестройка по частоте отсутствует.

Построение спектра сигнала

Модуль K-LC6 с внешним усилителем и схемой порогового детектирования пригоден для обнаружения движущихся объектов (человека) на расстоянии до 15 м в помещении. Детектор D200100 фирмы Microwave Solutions [3], выполненный с применением аналогового подхода и на основе модуля C200100, имеет дальность около 6 м. Вне помещения эта цифра будет еще меньше, так как в открытом пространстве отсутствуют переотражения сигнала. Ограничивающими факторами для подобных датчиков являются помехи от люминесцентных ламп, а также медленные флуктуации сигнала во времени, на фоне которых выделить полезный сигнал простыми средствами не представляется возможным.

Модуль K-LC6 имеет два I/Q-выхода, что позволяет применить комплексное преобразование Фурье (КПФ) для построения спектра. Выборка из 1024 точек с частотой дискретизации 3200 Гц снимается примерно за 320 мс, что дает разрешение по частоте около 3 Гц и соответствует диапазону скоростей от 0,07 до 36 км/ч согласно упрощенной формуле (1):

$$v = Fd/44, \quad (1)$$

где Fd — частота Допплера, Гц; v — скорость объекта по направлению к датчику, км/ч.

Следует отметить, что при увеличении частоты дискретизации можно получить больше выборок в секунду, но тогда ампли-

тудный спектр шумов увеличивается, а это приводит к уменьшению максимальной дальности обнаружения. Скорости 3 выб./с вполне достаточно для обнаружения движущегося человека. В теории КПФ позволяет определить также направление движения объекта, однако на практике реализовать это напрямую на K-LC6 затруднительно, поскольку у модуля есть значительный дисбаланс амплитуды/фазы по каналам I/Q. Для обработки сигнала использовалась отладочная плата XMC4500 Relax Kit Lite V1 [4]. Она занимает всего лишь несколько миллисекунд благодаря мощному контроллеру Cortex-M4, работающему на частоте 120 МГц. Так, время вычисления комплексного БПФ с помощью

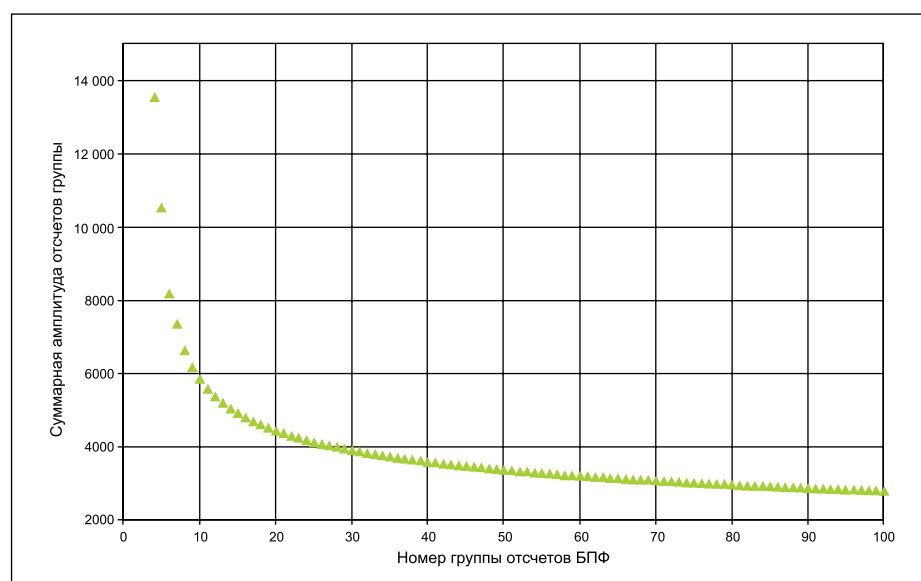


Рис. 1. Амплитудный спектр шумов датчика на основе K-LC6

функции `arm_cfft_radix4_f32` из библиотеки CMSIS составляет около 910 мкс, а амплитудного спектра с помощью функции `arm_cmplx_mag_f32` — 200 мкс. Соответственно, можно детектировать движение в охраняемой зоне около трех раз в секунду. Оцифровка данных проводилась с помощью двух 12-битных АЦП, предусмотренных в составе XMC4500. Нормированный амплитудный спектр выводился на цветной 5-дюймовый дисплей VM800B50A-BK [5] фирмы FTDI с разрешением 480×272 точки.

Оптимизация спектра сигнала

Построение спектра выявило ряд проблем, в частности, присутствие в нем паразитных составляющих 50, 100, 150 Гц, а также повышенный уровень шумов у начальных отсчетов (в области низких частот). Амплитудный спектр шумов K-LC6 в относительных единицах показан на рис. 1. Он получен следующим образом: сначала было проведено усреднение по восьми выборкам; затем суммированы зеркальные спектральные отсчеты, таким образом получено 511 отсчетов; потом были просуммированы каждые 5 отсчетов, в результате получено 102 отсчета; наконец, было проведено суммирование скользящим окном по 2 отсчета, что дало 101 отсчет, что мы и видим на рисунке. Поскольку абсолютная величина амплитуды не важна, данный алгоритм, по сути, является упрощенным нахождением среднего со скользящим окном. Он требует всего $4 \times 102 + 101 = 509$ сложений, тогда как скользящее окно по 510 точкам — $4 \times 506 = 2024$. Этот же алгоритм реализован на XMC4500 и используется для детектирования движения, то есть наблюдается превышение над шумами в спектре или нет. Последняя операция и введена для того, чтобы не происходило потери чувствительности, когда спектр движущегося объекта попадает на границу между интервалами по пять спектральных отсчетов. Поскольку началь-

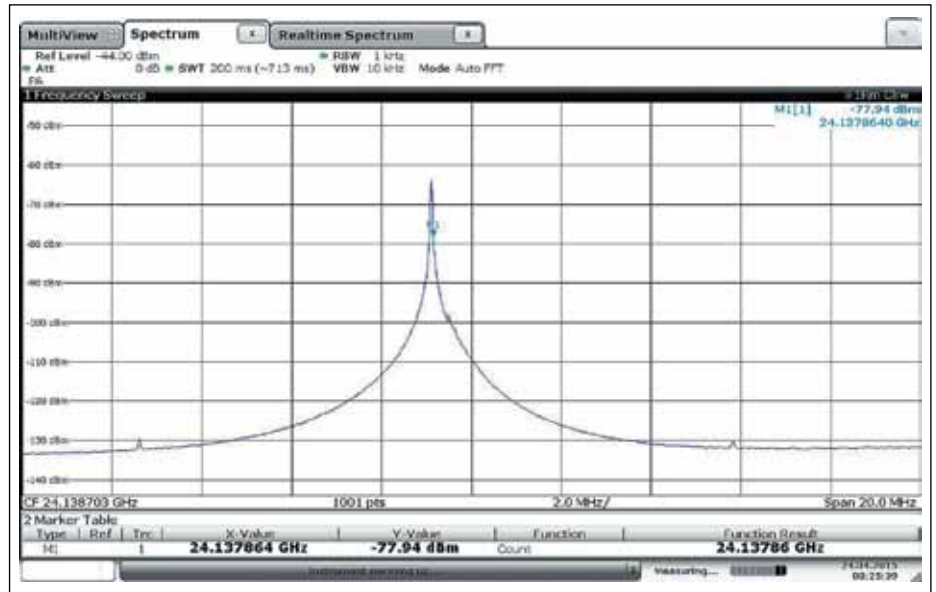


Рис. 2. Излучаемый спектр модуля K-LC6

ные отсчеты в амплитудном спектре сильно флуктуируют от выборки к выборке, было принято решение их не использовать.

Спектр излучаемого сигнала модуля K-LC6 на частоте 24,139 ГГц, снятый с помощью анализатора спектра R&S FSW26, представлен на рис. 2. Измерения проводились с помощью специалистов петербургского представительства Rhode & Schwarz. Похожий по качеству спектр 24 ГГц (рис. 3) можно получить на транзисторе NE3514S02, как описано в работе [6].

Опытным путем было установлено, что модуль K-LC6 крайне чувствителен к качеству питания. Применение стабилизатора ADM7150ACPZ-5.0 [7] с низким уровнем шумов, 1 мкВ в полосе частот от 100 Гц до 100 кГц (рис. 4), в стандартной схеме включения позволило избавиться практически от всех паразитных составляющих в спектре, кроме 50 Гц. Данная микросхема

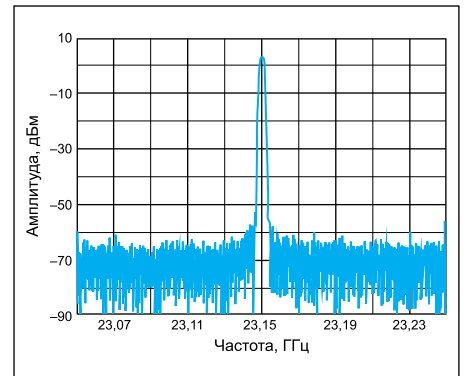


Рис. 3. Спектр генератора на NE3514S02

также обладает высоким коэффициентом стабилизации (PSRR), который в полосе частот от 5 Гц до 800 кГц лучше 80 дБ (рис. 5). Заметим здесь, что K-LC6 потребляет ток порядка 90 мА. Вместо ADM7150 можно ре-

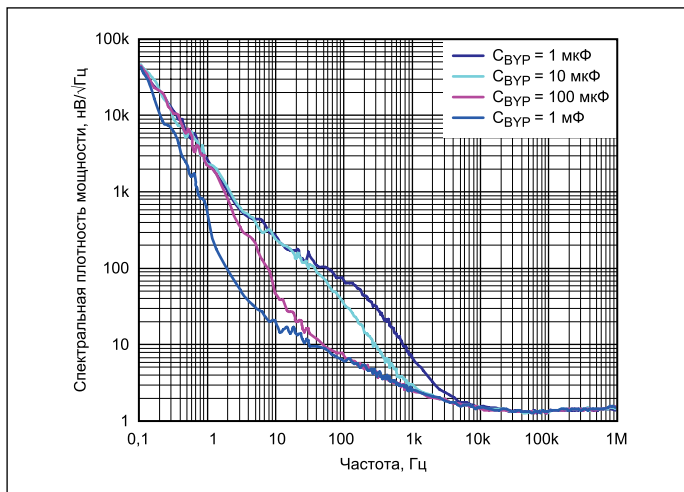


Рис. 4. Спектральная плотность мощности шумов ADM7150ACPZ-5.0 в зависимости от частоты при разных значениях фильтрующего конденсатора $C_{вур}$

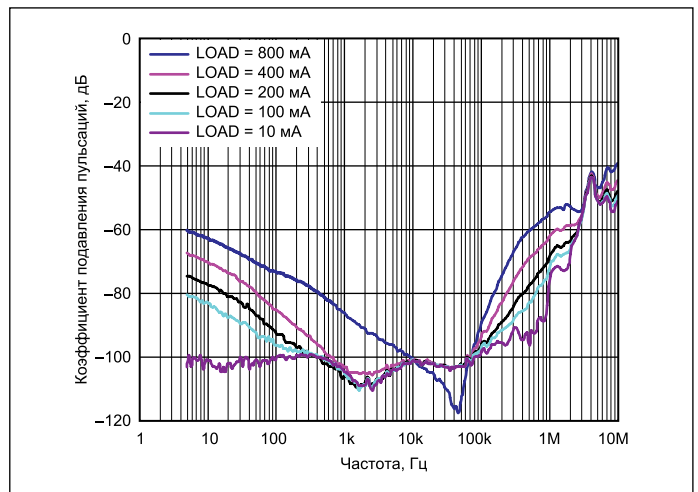


Рис. 5. Коэффициент стабилизации по мощности в зависимости от частоты для ADM7150ACPZ-5.0 при разных токах нагрузки. (Выходное напряжение: 5 В, входное 6,2 В)

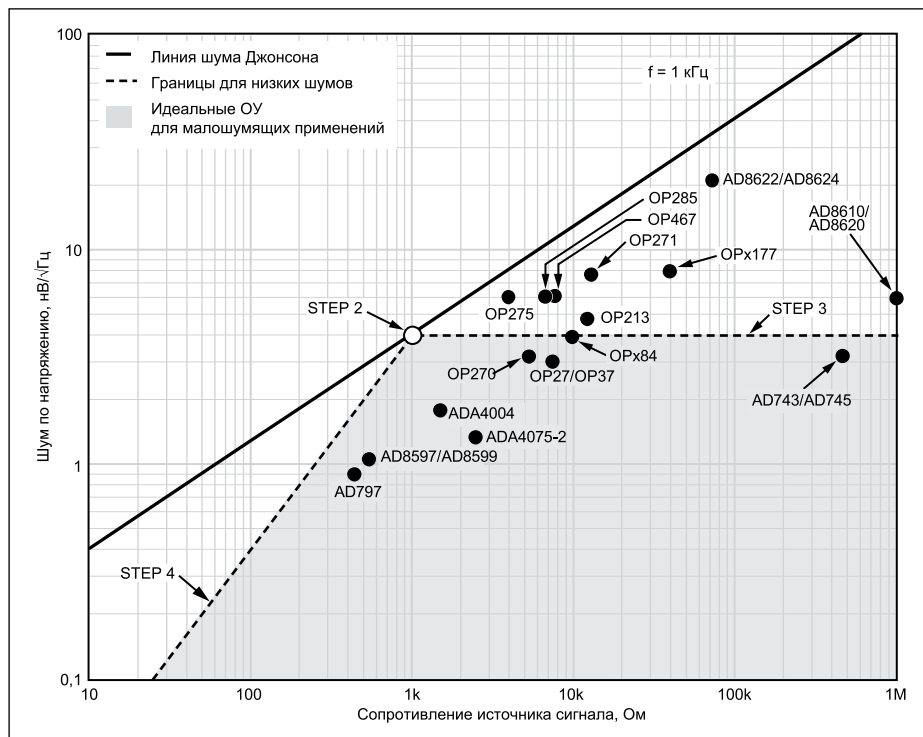


Рис. 6. Выбор малошумящего ОУ фирмы Analogue Devices

комендовать LT3042 [8] с шумами 0,8 мкВ в полосе частот от 10 Гц до 100 кГц и PSRR лучше 78 дБ в полосе частот от 5 Гц до 3 МГц.

Выход модуля К-ЛС6 представляет собой, по сути, полумостовой выпрямитель на СВЧ-диодах, нагруженный на резистор 1 кОм, включенный параллельно с емкостью. Из-за просачивания гетеродина на обоих выходах модуля присутствует напряжение порядка –20 мВ. При нагрузке выходов внешними резисторами паразитная составляющая 50 Гц в спектре уменьшается (похожий эффект достигается экранированием входных цепей, что говорит о наличии электромагнитной наводки). Попутно должно происходить расширение полосы частот детектора, которая заявлена в документации как 50 МГц. Однако использовать резисторы меньше чем 1 кОм не рекомендуется. Так, уже при суммарной нагрузке 330 Ом происходит частич-

ное подгорание СВЧ-диодов, и дальность действия модуля необратимо уменьшается. Модули К-ЛС6_V2 имеют встроенный усилитель 20 дБ и не требуют особой осторожности в обращении, но проигрывают по шумам (похоже, что там используется обычный ОУ, подобный LM284).

Шумы дискретизации АЦП заметно уменьшаются при аккумулировании двух результатов и, соответственно, увеличении частоты тактирования АЦП в 2 раза. Аккумулирование четырех результатов не приносит дальнейшего заметного улучшения.

Дополнительной необходимой мерой является также экранирование модуля металлическим корпусом, что устраняет воздействие помех от боковых и задних лепестков печатной антенны.

Выбор малошумящего усилителя

Как известно, шумы входного усилителя влияют на характеристики системы в целом. Поэтому он требует повышенного внимания. На рис. 6 показано пространство выбора малошумящих ОУ фирмы Analogue Devices из руководства по применению [9]. Был сделан выбор в пользу AD8599, как обладающего минимальными шумами (1,1 нВ/√Гц к 1 кГц). Его недостатками являются стоимость, потребление и двуполярное питание ±5 В.

Как дешевую альтернативу можно также рассматривать ADA4075-2ARZ (2,8 нВ/√Гц к 1 кГц), а для однополярного питания — OP284FZ (3,9 нВ/√Гц к 1 кГц). Большой вы-

бор малошумящих ОУ предоставляет фирма Linear Technology [10], а RFBeam рекомендует использовать LMV772, хотя его шумы заметно больше (7,5 нВ/√Гц к 10 кГц), а цена достаточно высока.

Для генерации напряжения –5 В с низкими шумами был использован преобразователь на переключаемых конденсаторах со встроенным линейным стабилизатором семейства MAX85x — MAX851ESA.

Итак, с помощью всех вышеперечисленных мер удалось получить устойчивое обнаружение движущегося человека в условиях улицы, по центру диаграммы направленности антенны, на расстоянии около 30 м. Эпизодическое обнаружение получено на расстоянии до 40 м. В условиях помещения результаты значительно лучше ввиду переотражений сигнала от стен, пола и потолка. Так, датчик устойчиво обнаруживает движение в условиях коридора длиной 56 м, шириной около 2 м и высотой потолка 3 м.

К сожалению, на данный момент производители датчиков движения не предлагают четкого критерия понятия «движущийся человек», что затрудняет сравнение характеристик датчиков различных фирм. Возможно, в дальнейшем такой эквивалент будет предложен, например в виде металлизированного шара фиксированного диаметра.

Литература

1. Горбатов К. Радарные модули фирмы RFBeam диапазона ISM 24,05–24,25 ГГц // Компоненты и технологии. 2015. № 4.
2. Product Selection Guide. Dec.2014 RFbeam Microwave GmbH. www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/_SelectionGuide.pdf
3. D200100: 24.10GHz people detector. www.microwave-solutions.com/d200100.html
4. Evaluation Board: XMC4500 Relax Kit & XMC4500 Relax Lite Kit. www.infineon.com/dgdl/Board_Users_Manual_XMC4500_Relax_Kit-V1_R1.2_released.pdf?fileId=db3a30433acf32c9013adf6b97b112f9
5. VM800B Datasheet. www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS_VM800B.pdf
6. A K-Band VCO Based on EBG Resonator. XU Feng, WANG Xin'an, CHENXu Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis. Vol. 49, No. 3 (May 2013). www.paper.edu.cn/journal/
7. ADM7150: 800 mA Ultralow Noise, High PSRR, RF Linear Regulator. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADM7150.pdf
8. LT3042: 20V, 200mA, Ultralow Noise, Ultrahigh PSRR RF Linear Regulator. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3042fa.pdf>
9. Analog Devices AN-940: Low Noise Amplifier Selection Guide for Optimal Noise Performance. www.n4iq.com/easy_loop_antenna/163599846AN_940.pdf
10. Op Amp Selection Guide for Optimum Noise Performance. Design Note 355. <http://cds.linear.com/docs/en/design-note/dn355f.pdf>