

Радарные модули фирмы RFBeam диапазона ISM 24,05–24,25 ГГц

Швейцарская фирма RFBeam, основанная в 2008 году, специализируется на радарных модулях СВЧ диапазона 24,05–24,25 ГГц (ISM — Instrumentation Scientific Medicine) со встроенными планарными антеннами. Радарный модуль состоит из приемной и передающей антенн, перестраиваемого ГУН, МШУ и квадратурного смесителя. Некоторые модели содержат усилитель ПЧ с полосой пропускания 10 Гц — 15 кГц и фильтры. Диаграмма направленности антенны находится в пределах от 138×132 до 5,6×5°, что позволяет обнаруживать движущийся автомобиль на максимальном расстоянии от 15 м до 1 км, а человека — от 7 до 400 м. Габариты модулей составляют от 25×25×6 до 187×144×10 мм и определяются в основном размерами антенн. Основное назначение радарных модулей — применение в охранных системах (детекторах движущихся объектов); измерение скорости и расстояния с невысокой точностью (ЛЧМ и ЧМ).

Константин ГОРБАТОВ
kvg@efo.ru

Преимущества и недостатки технологии 24 ГГц

Помимо СВЧ, существуют инфракрасные, лазерные и ультразвуковые датчики движения. К преимуществам СВЧ-датчиков относится возможность работы в условиях тумана и запыленности, функционирование на больших дальностях (до 1 км), измерение как больших, так и малых скоростей. Они не подвержены действию ветра, что является недостатком ультразвуковых датчи-

ков, и температуры, что остается проблемой для инфракрасных датчиков. СВЧ-датчики можно устанавливать скрытно, за любым радиопрозрачным материалом. К недостаткам относится сложность детектирования движения по радиусу от датчика, для этого требуется построение хотя бы простейшей ФАР. Сильный дождь или снегопад значительно снижает радиус действия радарного модуля. СВЧ-датчики дороже ультразвуковых и инфракрасных, но дешевле лазерных. Важно, что данные модули не требуют ли-

цензирования на территории России. Вот выдержка из Постановления Правительства РФ от 13.10.2011 № 837 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. № 539» [1]: «Изыятия из перечня радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств, подлежащих регистрации: 26. Устройства для обнаружения передвижения и устройства радиосигнализации в полосе радиочастот 24,05–24,25 ГГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 100 мВт».

Линейка радарных модулей фирмы RFBeam

Параметры радарных модулей представлены в таблице 1 [2]. Надо отметить, что здесь приведены экспериментальные данные и для некоторых моделей они подразумевают цифровую обработку сигнала от датчика. Модули построены по схеме с синхронным детектированием, имеют эффективную изотропно-излучаемую мощность (EIRP) 10–19 дБм и чувствительность приемника sensitivity от –95 до –126 дБм. Чувствительность в Data Sheet дана уже с учетом усиления антенны (при отношении сигнал/шум 6 дБ и полосе ПЧ 10 Гц – 1 кГц). Энергетический потенциал для модулей составляет соответственно 105–145 дБ. Он указан в Data Sheet как overall sensitivity и рассчитан исходя из EIRP модуля и чувствительности приемника. Таким образом, чем больше усиление антенны и уже ее диаграмма направленности, тем чувстви-

Таблица 1. Характеристики модулей фирмы RFBeam

Модель	Дистанция обнаружения		Диаграмма направленности		I/Q-выход	Усилитель ПЧ	Питание		ГУН	Размер, мм
	человек	машина	вертик. *	горизонт. *			Напряжение, В	Ток, мА		
K-LC3	7	15	138	132	нет	нет	5	35	нет	25×25×6
K-LC3_V2	7	15	138	132	нет	нет	3,3	35	нет	25×25×6
K-LC2	9	22	80	34	да	нет	5	35	да	25×25×6
K-LC1a	12	30	80	34	нет	нет	5	35	да	25×25×6
K-LC1a_V2	12	30	80	34	нет	нет	5	35	нет	25×25×6
K-LC1a_V4	12	30	80	34	нет	нет	3,3	35	да	25×25×6
K-LC1a_V5 *	12	30	80	34	нет	нет	3,3	35	нет	25×25×6
K-XC1_SMA	—	—	внешняя антенна		да	да	12–24	300	нет	—
K-XC1_Ant	8	15	25	12	да	да	12–24	300	нет	110×77×10
K-LC5	25	60	80	34	да	нет	5	45	да	25×25×6
K-LC5_V2	25	60	80	34	да	нет	5	45	нет	25×25×6
K-LC6	35	80	80	12	да	нет	5	45	да	66×25×6
K-LC6_V2	35	80	80	12	да	да	5	47	да	66×25×6
K-MC4	40	100	30	12	да	да	5	120/10	да	98×78×7
K-MC5_LP *	40	100	6,5	4,9	да	да	3–6	9	нет	187×144×10
K-MC1	60	150	25	12	да	да	5	100/10	да	65×65×6
K-MC1_LP	60	150	25	12	да	да	3–6	7,5	нет	65×65×6
K-MC3	70	180	25	7	да	да	5	100/10	да	105×85×5
K-NC1	400	1000	25	12	да	да	15–30	220	ФАПЧ	110×77×19

Примечание. *Новые модели в разработке

тельность лучше. Модули не имеют встроенного делителя частоты, поэтому использование их в системах ФАПЧ затруднительно.

Исключение составляет модуль К-НС1, в котором реализована ФАПЧ и стабильность частоты составляет $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ со встроенным генератором. Он может работать либо в режиме с внешней частотной модуляцией, либо с внутренней со сдвигом частоты на 10 МГц. В модуле предусмотрен супергетеродинный приемник с частотой ПЧ 10 МГц, логарифмический и обычный детекторы, интерфейс USB, I/Q-детектор и преобразователь напряжения. Заявленная чувствительность -144 дБм , а потенциал линка 164 дБ исходя из 20 дБм излучаемой мощности.

Следует также выделить модуль К-ХС1, представляющий собой полноценный измеритель дальности с разрешающей способностью 1 см и интерфейсом USB. Модули К-МС1_LP и К-МС5_LP относятся к категории низкопотребляющих, поскольку работают в импульсном режиме со скважностью 1%.

Практический опыт применения модуля К-LC6_V2

Внешний вид модуля К-LC6_V2 показан на рис. 1, а его структурная схема изображена на рис. 2. Габариты модуля $66 \times 25 \times 6 \text{ мм}$, а диаграмма направленности $80^\circ \times 12^\circ$, так что при высоте подвеса 18 м он позволяет охватить площадь порядка 100 м^2 . При включении модуль потребляет ток примерно 90 мА. Проверка устройства выполнялась с помощью осциллографа и производилась при размахивании металлической пластиной вблизи (10–20 см) от антенны модуля. В итоге удалось получить сигнал ПЧ с размахом около 1 В, который показан на рис. 3 (данная и последующие осциллограммы получены с помощью цифрового осциллографа фирмы GW Instek GDS-2104), и это при наличии встроенного усилителя 20 дБ. Соответственно, для модуля К-LC6 (без дополнительного усилителя) следует ожидать размах сигнала около 100 мВ.



Рис. 1. Внешний вид К-LC6_V2

Согласно схеме, рекомендованной производителем [3], был изготовлен усилитель с общим коэффициентом усиления 73 дБ и полосой пропускания 2,5 Гц – 1,6 кГц, его схема представлена на рис. 4. Он предназначен для применения с модулями без усилителя ПЧ (например, К-LC6). Для использования совместно с К-LC6_V2 его усиление слишком большое, и его пришлось уменьшить на 6 дБ.

Первое, что удалось выяснить, — высокая чувствительность модуля к качеству питания. Источник питания фирмы GW Instek GPS-4303 имеет пульсации 10 мВ. Развязка «питание +5 В — СВЧ-выход» составляет лишь 26 дБ, а чувствительность модуля -108 дБм . Проблема была решена постановкой гасящего резистора 10 Ом и емкости 2200 мкФ по +5 В и стабилизатора напряже-

ния SPX1117M3-L-5-0, который в свою очередь обеспечивает подавление помехи по питанию на величину порядка 75 дБ.

Второе — это чувствительность модуля к помехам от ламп дневного света. Они излучают в очень широком диапазоне частот, в том числе и в ISM. К тому же их излучение модулировано сетевой помехой 100 Гц. Для таких условий на рис. 5 показан сигнал с К-LC6_V2 в отсутствие движущегося объекта, а на рис. 6 сигнал, когда объект (человек) движется на расстоянии 16–17 м, при этом полоса пропускания внешнего усилителя 7–70 Гц, а расчетное усиление 67 дБ. Для больших дальностей, ввиду помехи в сигнале от ламп дневного света, простой детектор уровня неприменим. В связи с низкой стоимостью современных микроконтроллеров, более перспективным представляется метод

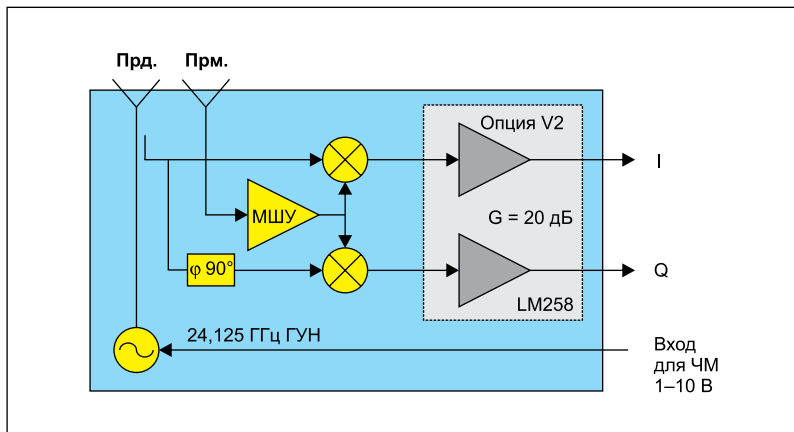


Рис. 2. Блок-схема К-LC6_V2

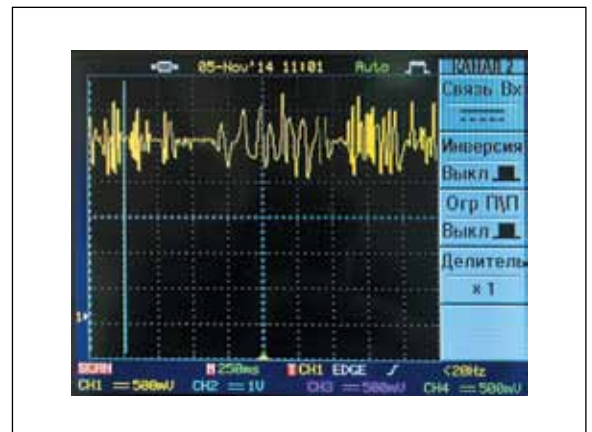


Рис. 3. Максимальный сигнал с выхода К-LC6_V2

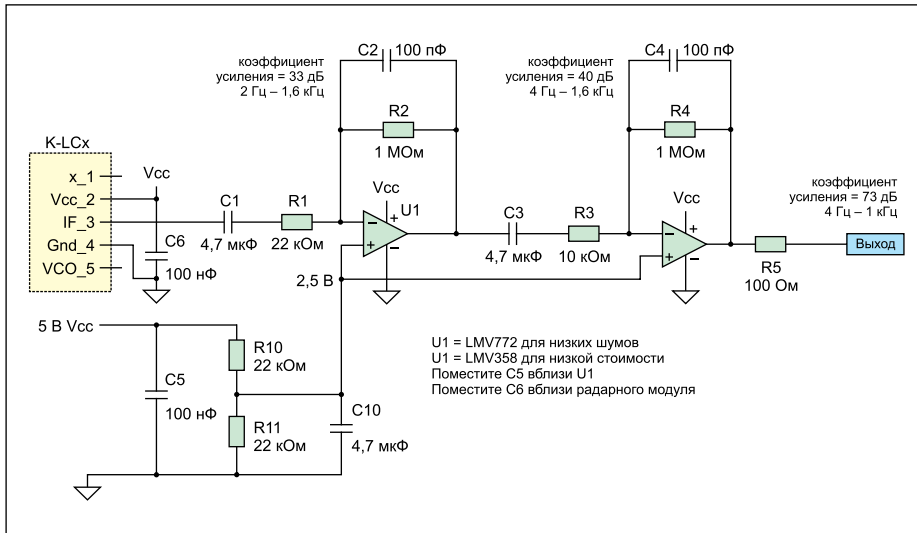


Рис. 4. Схема дополнительного усилителя

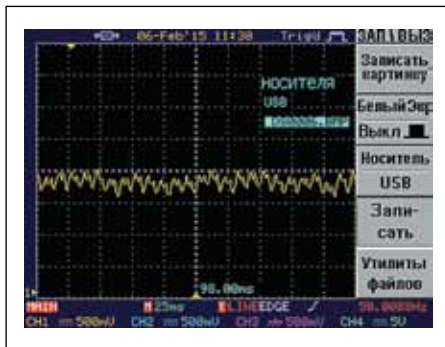


Рис. 5. Выходной сигнал усилителя на LM258N, нет движущегося объекта

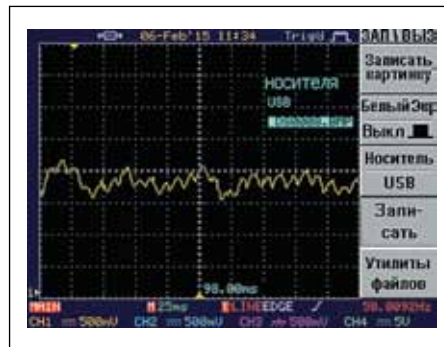


Рис. 6. Выходной сигнал усилителя на LM258N, человек движется на расстоянии 16–17 м

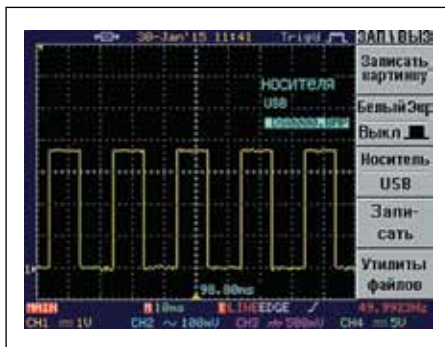


Рис. 7. Усилитель LM258N в режиме ограничения

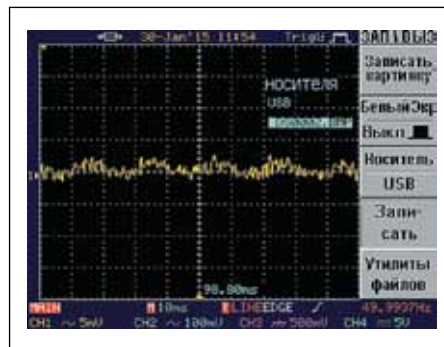


Рис. 8. Собственные шумы усилителя на LM258N, вход замкнут на «землю»

нию режима работы и первого каскада. Постоянная же времени $\tau R10 \parallel R11 \& C10$ равна 50 мс. Учитывая общий высокий коэффициент усиления, этот эффект будет действовать еще значительное время. Так, 1% от изменения режима будет наблюдаться через время 5τ, или 250 мс. Осциллограмма выхода усилителя в режиме ограничения показана на рис. 7. Следует отметить, что ограничение ОУ по выходу не симметричное. Если низкий уровень близок к уровню «земли», то высокий уровень не стоит от уровня питания на 1,3 В. Шумовая дорожка усилителя при его входе, замкнутом на «землю», показана на рис. 8. Ее размах около 4–5 мВ, внутри видна наводка 50 Гц. Отметим, что усилитель был собран на макетной плате с использованием LM258N (DIP-8, –40°...+85 °С). Для печатной платы и компонентов SMD результат должен быть лучше. Для построения более качественного усилителя можно рекомендовать LMV772 (шумы $f = 100$ Гц 12,5 нВ/√Гц) или ОР284 ($f = 1$ кГц 3,9 нВ/√Гц). Оба ОУ способны работать от однополярного питания +5 В и являются Rail-to-Rail, то есть максимальный размах выходного сигнала очень близок к напряжению питания. Но при этом стоимость такого усилителя увеличивается в несколько раз по сравнению с рассмотренным вариантом.

Собственные шумы модуля K-LC6_V2

Заявленная чувствительность модуля –108 дБм дана [5] с учетом усиления антенны. Поскольку усиление антенны 12,5 дБ, собственная чувствительность приемника будет –95,5 дБм при отношении сигнал/шум 6 дБ в полосе 1 кГц. Это означает, что собственные шумы приемника меньше на эту же величину и составляют –101,5 дБм. Пересчитаем –101,5 дБм мощности со входа к выходу, учитывая вклад:

- +10 дБ — МШУ;
- –6 дБ — потеря в смесителе;
- +20 дБ — встроенного усилителя;
- +40 дБ — внешнего усилителя.

В итоге получим 64 дБ усиления, соответственно, на выходе будет –37,5 дБм мощности, или 0,178 мкВт. Переведем эту величину в размах синусоидального напряжения согласно формуле:

$$U = 2\sqrt{2} \times \sqrt{P \times R}, \quad (1)$$

где P — мощность, Вт; R — сопротивление, Ом и U — размах напряжения, В. В результате получим:

$$2\sqrt{2} \times \sqrt{(0,00000178 \times 50)} = 0,0084, \text{ или } 8,5 \text{ мВ.}$$

Так как реальная форма шумовой дорожки на выходе усилителя отлична от синусоидальной, данная формула является оценочной.

цифровой обработки, то есть оцифровка сигнала с помощью встроенного АЦП, построение спектра с помощью БПФ и его дальнейший анализ. К примеру, цена [4] для 32-разрядных микроконтроллеров семейств XMC1100/XMC1200 фирмы Infineon со встроенным 12-разрядным АЦП и тактовой частотой 32 МГц находится в интервале 0,6–1,1 евро, что в несколько десятков раз меньше стоимости самого радарного модуля и сопоставимо со стоимостью аналоговой обвязки.

У предложенной схемы выявлен и недостаток, который заключается в том, что средняя точка 2,5 В формируется резисторным делителем R10, R11 и емкостью C10. Она подключена к прямым входам обоих каскадов ОУ. В случае когда второй каскад однократно входит в ограничение при большом уровне сигнала, напряжение между входами ОУ становится отличным от нуля, а поскольку внутри ОУ установлены встречно включенные защитные диоды, напряжение средней точки изменяется, что приводит к измене-

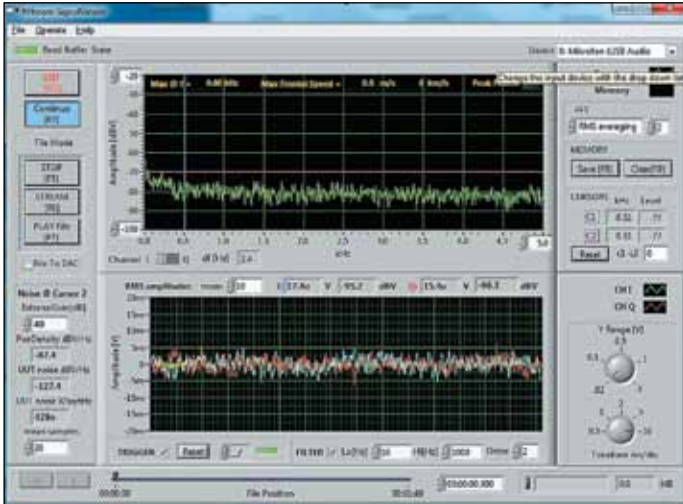


Рис. 9. Спектр шумов и шумовая дорожка K-LC6_V2

Шумовая дорожка для полосы пропускания 10 Гц – 1 кГц представлена внизу на рис. 9 и неплохо совпадает с расчетной. Вверху же показано распределение плотности мощности шумов в зависимости от частоты. Следует отметить, что при практическом измерении шумов непосредственно с внешнего усилителя возникают сложности из-за наличия в шумовой дорожке помех 100 и 50 Гц.

Расчет дальности действия модуля K-LC6_V2

Согласно [5] дальность действия модуля может быть рассчитана исходя из «энергетического потенциала», который для дан-

ного модуля составляет 126 дБ, ЭПР объекта и формулы (2). Формула является вариацией известной формулы радиолокации для частоты 24,125 ГГц:

$$r = 0,0167 \times 10^{(s/40)} \times \sqrt[4]{\sigma}, \quad (2)$$

где r — расстояние до объекта в метрах; s — энергетический потенциал в децибелах, σ — ЭПР объекта в квадратных метрах.

Используя формулу, получим расстояние обнаружения в центре диаграммы направленности (ДН). Исходя из ЭПР в 1 м² (человек): $0,0167 \times 10^{(126/40)} \times 1 = 0,0167 \times 10^{3,15} = 23,6$ м. Для ЭПР 50 м² (машина): $23,58 \times 2,659 = 62,7$ м. Рассчитанная таким образом дальность дей-

ствия для разных модулей приведена в таблице 2. Заметим, что цифры не всегда совпадают с таблицей 1. Например, для модуля K-LC6 приведено расстояние 35/80 м, что объясняется специальными методами обработки сигнала.

Об охраняемой зоне K-LC6_V2

Проведем оценку охраняемой площади для двух вариантов расположения датчика K-LC6_V2: перпендикулярно охраняемой зоне, как показано на рис. 10, и сбоку от охраняемой зоны, как видно на рис. 11.

При первом варианте датчик располагается в точке I, из которой опущен перпен-

Таблица 2. Расчетная дальность обнаружения для модулей фирмы RFBeam

Модель	Эффективная изотропно излучаемая мощность, дБм	Чувствительность модуля, с учетом усиления антенны, дБм	Энергетический потенциал, дБ	Дистанция обнаружения, рассчитанная по формуле (2), м		Дистанция обнаружения, приведенная в таблице 1, м	
				Человек, ЭПР = 1 м ²	Машина, ЭПР = 50 м ²	Человек, ЭПР = 1 м ²	Машина, ЭПР = 50 м ²
K-LC3	10	-95	105	7,042331607	18,72660165	7	15
K-LC3_V2	10	-95	105	7,042331607	18,72660165	7	15
K-LC2	15	-96	111	9,947557797	26,45202791	9	22
K-LC1a	15	-96	111	9,947557797	26,45202791	12	30
K-LC1a_V2	15	-96	111	9,947557797	26,45202791	12	30
K-LC1a_V4	15	-96	111	9,947557797	26,45202791	12	30
K-LC5	15	-103	118	14,88389067	39,57846733	25	60
K-LC5_V2	15	-103	118	14,88389067	39,57846733	25	60
K-LC6	18	-108	126	23,589377	62,72764344	35	80
K-LC6_V2	18	-108	126	23,589377	62,72764344	35	80
K-MC4	18	-116	134	37,38664301	99,41661507	40	100
K-MC1	18	-123	141	55,93922834	148,7506843	60	150
K-MC1_LP	18	-123	141	55,93922834	148,7506843	60	150
K-MC3	19	-126	145	70,42331607	187,2660165	70	180

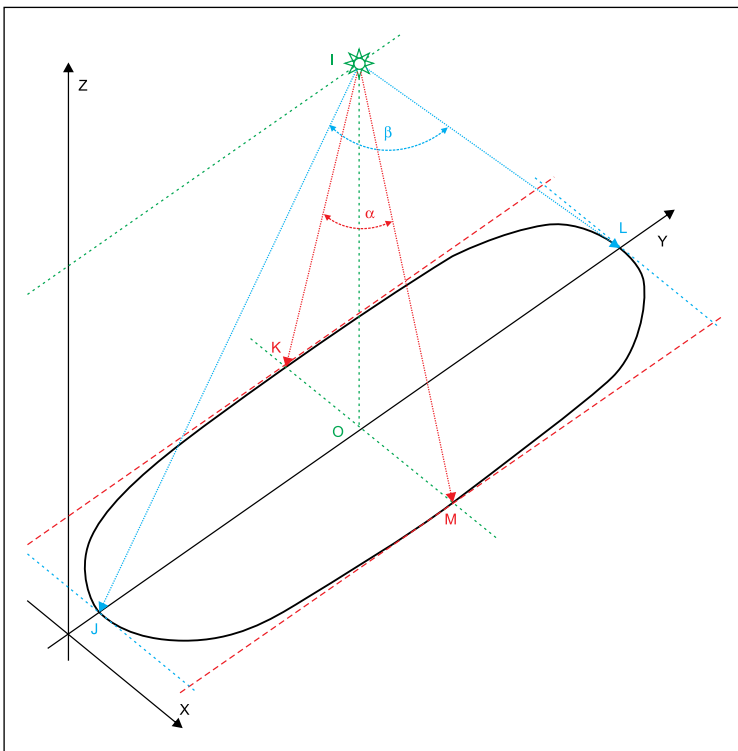


Рис. 10. Расположение K-LC6_V2 перпендикулярно охраняемой поверхности

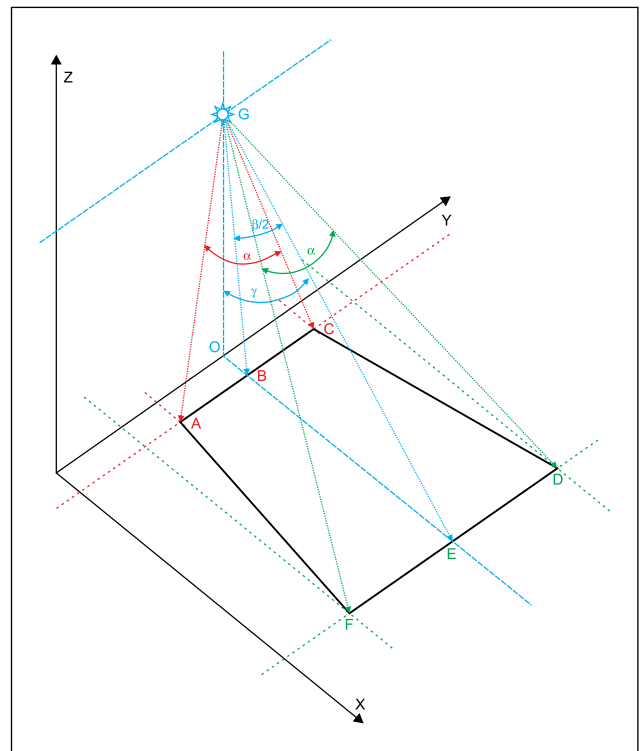


Рис. 11. Расположение K-LC6_V2 под углом к охраняемой поверхности

дикуляр Ю к плоскости XY. Треугольник KIM — это раскрыв ДН антенны по уровню 3 дБ в плоскости XZ с углом $\alpha = 12^\circ$. Треугольник JIL — раскрыв ДН в плоскости YZ, угол $\beta = 80^\circ$. В направлениях IJ, IK, IL, IM из-за уменьшения усиления антенны энергетический потенциал будет на 6 дБ меньше (120 дБ), что даст нам расстояние обнаружения 16,7/44,5 м для человека и машины соответственно. Приняв расстояние $JI = IL = 16,7$ м, а получившуюся фигуру JKLM за эллипс, вычислим высоту размещения датчика 12,8 м, расстояния: $JO = OL = 10,74$ м, $KO = OM = 1,34$ м и площадь эллипса 45,39 м². Фактическая охраняемая площадь будет больше примерно на 5–10%, то есть около 50 м², поскольку точки K, M еще можно сместить от центра O до достижения энергетического потенциала 120 дБ. Для точных вычислений необходима трехмерная модель ДН антенны. Недостаток данной схемы размещения заключается в том, что в окрестности точки O движение объекта в плоскости XZ практически не будет создавать радиальной составляющей по отношению к датчику в точке I. Этот эффект в какой-то степени компенсируется мак-

симальной мощностью излучения в данной области.

При втором варианте размещения (рис. 11) антенна установлена в точке G, предполагается, что плоскость ZY — это стена, центр ДН антенны расположен к ней под углом γ , а в плоскости XY лежит охраняемая поверхность. Треугольник FGD — это раскрыв ДН антенны по уровню 3 дБ, угол $\alpha = 12^\circ$. Треугольник BGE — это половина раскрыва ДН антенны, угол $\beta/2 = 40^\circ$. В направлениях GF, GD энергетический потенциал будет меньше на 6 дБ, а в GA, GC — на 12 дБ с расстояниями обнаружения человек/машина 16,7/44,5 и 11,8/31,4 м соответственно. Задав расстояния $GA = GC = 12,8$ м, $GF = GD = 16,7$ м, найдем угол $\gamma = 45^\circ 17' 05''$ и высоту подвеса 11,685 м. Площадь трапеции ACDF 68,25 м², фактическая же охраняемая площадь будет представлять сечение 3-мерной ДН, проходящее через точки ACDF, и будет больше примерно на 15–20%, то есть составит около 82 м². Заметим, что в этом варианте размещения площадь больше, чем в первом, и вообще нет зоны с нулевой радиальной составляющей.

В обоих случаях не учитывалось изменение ЭПР объекта от угла падения радиоволны. Также следует помнить, что при применении цифровых методов обработки сигнала дальность обнаружения K-LC6_V2 увеличивается до 35 м в центре ДН антенны, а охраняемая площадь примерно в 2 раза. ■

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 13.10.2011 № 837 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. № 539».
2. Product Selection Guide. RFbeam Microwave GmbH. December 2014. www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/_SelectionGuide.pdf
3. “Typical Doppler Signal Amplifier” Application Note AN-04, RFbeam Microwave GmbH. www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/appnotes/AN-04%20TypicalSignalAmp.pdf
4. www.rutronik24.com
5. K-LC6 RADAR TRANSCEIVER. RFbeam Microwave GmbH. www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/ProductBrief_K-LC6.pdf