



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 17 за 2025 г.



ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

**В.Е. Пряничников, В.В. Ястребов**

Обнаружение препятствий с  
помощью радара-детектора с  
борта мобильной  
робототехнической  
платформы

Статья доступна по лицензии  
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Пряничников В.Е., Ястребов В.В. Обнаружение препятствий с помощью радара-детектора с борта мобильной робототехнической платформы // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2025. № 17. 31 с. EDN: [RLJLGK](https://doi.org/10.26907/2071-2898.2025.17.31)  
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2025-17>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В. Келдыша  
Российской академии наук**

**В.Е. Пряничников, В.В. Ястребов**

**Обнаружение препятствий с помощью  
радар-детектора с борта мобильной  
робототехнической платформы**

**Москва – 2025**

*В.Е. Пряничников, В.В. Ястребов*

### **Обнаружение препятствий с помощью радара-детектора с борта мобильной робототехнической платформы**

В работе описывается поиск подходов к детектированию и анализу отрицательных препятствий (впадины, выбоины в дорожном покрытии) на пути мобильного сервисного робота, в которые могут проваливаться колеса и гусеницы робота при движении со скоростью, не превышающей 5-6 м/с. Детектирование необходимо было осуществлять в реальном масштабе времени с помощью узко-направленного Доплер-радар, установленного на платформе робота. Поэтому систему обнаружения оказалось необходимым строить с использованием преимущественно аналоговых подходов к обработке СВЧ-сигналов. На основе моделирования и экспериментов были предложены решения, обеспечивающие безопасное движение робота. Приведены примеры моделирования и реализации способов детектирования появления отрицательных препятствий на пути движения робота.

**Ключевые слова:** робототехника, мобильный сервисный робот, отрицательное препятствие, радио трансивер, Доплер-радар

*V.E. Pryanichnikov, V.V. Iastrebov*

### **Obstacle detection using a radar detector from a mobile robotic platform**

This paper describes the search for approaches to detecting and analyzing negative obstacles (depressions, potholes in the road surface) in which the wheels and tracks of a moving mobile service robot at a speed not exceeding 5-6 m/s, can stuck. Detection is proposed to be executed in real time by means of a narrowly focused Doppler radar installed on the robot platform. Based on the modeling and experiments, the conditions for safe movement of the robot are described. Examples of modeling and implementation of negative obstacle detection and robot movement are given.

**Keywords:** robotics, mobile service robot, negative obstacle, radio transceiver, Doppler radar

## 1. Введение

*Цель работы* состояла в разработке концепции системы быстрого определения дорожных провалов (отрицательных препятствий), состоящих из специального доплеровского СВЧ-радара-трансивера, установленного на мобильной роботизированной платформе (МРП). Для обеспечения безопасности движения необходимо заблаговременно обнаруживать и, возможно, распознавать отрицательные препятствия на пути движущейся роботизированной платформы с расстояния 10-15 метров в режиме реального времени без цифровой постобработки. Под «распознаванием» подразумевается заблаговременное обнаружение и возможность отличать отрицательное препятствие (провал в дороге) от положительного препятствия (все, что находится выше уровня дороги). Отрицательными препятствиями, которые необходимо обнаружить, являются значительные выбоины и траншеи, в которых колеса или гусеницы мобильной платформы могут застрять или повредиться (выбоины меньшего размера должны игнорироваться).

При написании препринта было решено максимально упростить описание механизма взаимодействия излучения сенсора с опорной поверхностью и препятствиями для обеспечения наглядности обоснования принятия решений по аппаратной реализации устройства обнаружения препятствий. Достаточность такого подхода обосновывается экспериментальным подтверждением работоспособности разработки.

### *Обзор известных подходов к проблеме*

В настоящее время методы заблаговременного обнаружения отрицательных препятствий в основном основаны на изображениях от прогнозирующего инфракрасного радара (ПИР), английская аббревиатура: FLIR (Forward-looking Infrared Radar) [1,2]. Однако эти методы имеют серьезные недостатки, связанные с дальностью действия, зависимостью от рабочих температур и геометрических факторов. Дальность обнаружения отрицательных препятствий быстро уменьшается с увеличением расстояния. Кроме того, для получения изображений от лазерного радара требуется пост-обработка, что приводит к задержке принятия решений для реализации действий, тем самым снижая максимальную скорость МРП.

Поэтому потребовалось специальное исследование, имевшее целью разработку и тестирование новых методов обнаружения отрицательных препятствий, основанных на более быстрых аналоговых системах обнаружения и включающих непрерывное радиочастотное генерирование волны с узкой диаграммой направленности по ходу движения МРП. «Пятно» от этого радиолуча как бы «скользит» по поверхности дороги перед подвижной платформой и не возвращается в приемник (отражается в пустоту), если поверхность ровная. Если же это «пятно» натывается на провал или на возвышение, луч отражается от них и возвращается в приемник трансивера. Дальнейшие усилия были сосредоточены на методах извлечения частоты

биений, которые возникают при совместной обработке излученного и отраженного сигналов, которая, по сути, является доплеровской частотой, пропорциональной скорости движения датчика, но также и расстоянию до цели в случае непрерывной частотной и фазовой модуляции излучающей волны. Поскольку мы получаем доплеровскую частоту, можно определить скорость, с которой движется робот. Но главная особенность системы в том, что при самом возникновении этой частоты алгоритм управления движением робота может снизить скорость движения МРП, изменить направление движения или прервать движение, основываясь на таких предупредительных сигналах.

Одним из первых способов обнаружения выбоин на дороге было использование длинной наклонной штанги с колесом на её дальнем конце, которое катилось перед платформой. Когда колесо проваливалось в выбоину, обнаруживался и измерялся угол наклона стержня. Как правило, длина такого «удилища» не превышала 3-4 м (рис.1).

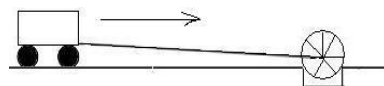


Рис. 1. Как определяли отрицательные препятствия в прошлом

Наша идея заключается в том, чтобы заменить такой механический и неудобный стержень узким радиолучом, который должен «скользить» по поверхности дороги перед движущимся транспортным средством и реагировать на наличие выбоин. Для этого предложено использовать непрерывное радиочастотное возбуждение. Доплеровский метод обычно используется для обнаружения движения или измерения скорости. По нашему мнению, он может служить также в качестве датчика реального времени для обнаружения и классификации препятствий. Поскольку он является аналоговым, то можно ожидать, что он будет быстрее, чем любые цифровые методы обработки. В нашем случае доплеровский детектор движения непрерывно передает узкий спектр волнового излучения, а приемник настроен на прием волн, возвращающихся от препятствий впереди. Передающие и принимающие колебания (от целевых выбоин) перемножаются в аналоговом умножителе, а доплеровский диапазон частот подвергается низкочастотной фильтрации. Сигнал доплеровской частоты (частота биений) появляется на выходе, только когда выполняются одновременно два условия:

- излучаемая волна отражается от выбоины (или любого другого препятствия) и возвращается обратно в приемник;
- платформа движется.

Идея в том, чтобы направить вперед и наклонить вниз передатчик-приемник так, чтобы «пятно» от узкого радиолуча «соприкасалось» с поверхностью дороги на расстоянии 8-15 метров впереди движущейся платформы и никакие волны не возвращались обратно от ровной дороги, т.е. дороги без препятствий. Другими словами, мы выбираем угол наклона  $\theta_1$  таким

образом, чтобы передаваемая волна отражалась от ровной дороги и не возвращалась в приемник (рис. 2а).

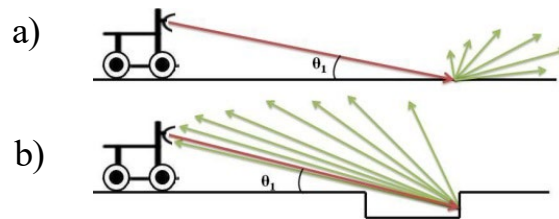


Рис. 2. Отражение узконаправленного луча радара: а) от ровной асфальтированной дороги; б) от выбоины на этой дороге

Когда же излучаемая волна натывается на препятствие и возвращается в приемник (рис. 2б), на выходе фильтра низких частот появляется доплеровское колебание частоты биений, которое мы используем как сигнал о наличии препятствия. По полученной доплеровской частоте мы также можем определить скорость, с которой движется платформа. В этом случае алгоритм управления движением платформы может снизить скорость, изменить направление движения или даже прервать движение, основываясь на таких сигнальных данных.

## 2. Первоначальная верификация метода обнаружения

Для верификации этой идеи была создана гибкая и реконфигурируемая платформа с ручным приводом для экспериментов с доплеровским радаром 10.5 ГГц на борту (рис. 3).

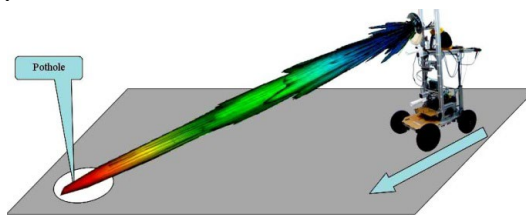


Рис. 3. Тележка с ручным приводом и доплеровским радаром

Доплеровский радар состоит из СВЧ датчика движения (трансивера), часто применяемого для автоматического открытия дверей с очень широкой ( $\sim 240^\circ$ ) диаграммой направленности излучения, эффективно работающего в диапазоне дальностей до 9 м. Его широкая диаграмма была сужена путем помещения в фокусе параболического отражателя диаметром 30 см. Конечная диаграмма направленности суженного луча (частота 10.5 ГГц, длина волны  $\sim 3$  см) составила  $7^\circ$  и, за счет усиления отражателя, дальность действия увеличилась до  $\sim 76$  м (рис. 4). Для защиты датчика от обратного отражения от рефлектора, а также для ослабления интенсивности излучения и уменьшения дальности до  $\sim 15-20$  метров часть поверхности параболического зеркала была покрыта круглым куском поглощающего материала 10.5 ГГц (рис. 4).

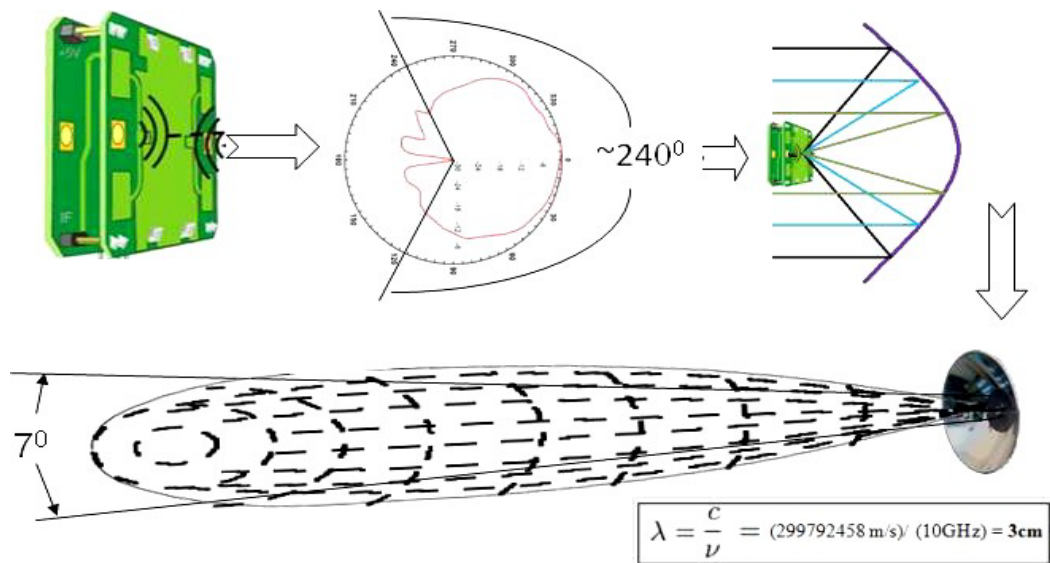


Рис. 4. Преобразование диаграммы направленности радара из широкой в узкую

### 3. Геометрические соображения об условиях обнаружения препятствий

Обнаружение и объезд отрицательных препятствий в реальном времени на высоких скоростях движения остается важной проблемой, требующей решения. Отрицательные препятствия можно разделить на два различных типа: впадины и провалы. Впадины — это участки, которые опускаются ниже окружающего рельефа — каналы, траншеи, ямы и т.д. Из-за ограниченной информации о глубине отрицательного препятствия обнаружить его сложнее, чем положительное препятствие. Видимая часть отрицательного препятствия уменьшается с увеличением дальности. При этом если угол, под которым наблюдается положительное препятствие, уменьшается на величину, обратную дальности, то угол, под которым видно отрицательное препятствие, уменьшается на величину, обратную квадрату дальности [1, 2] (рис. 5).

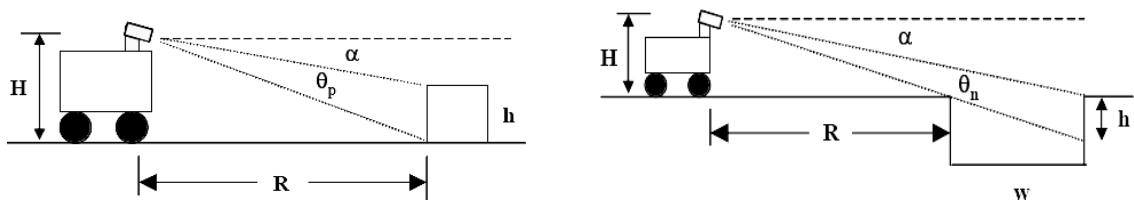


Рис. 5. Геометрия обнаружения препятствий:

а) положительного препятствия

$$\theta_p \sim h / R$$

б) отрицательного препятствия

$$\theta_n \sim H w / R (R+w)$$

Поскольку ширина препятствий  $w$  может быть менее 0,5 м, а интересующие нас дальности  $R$  часто превышают 5 м, в знаменателе будет преобладать член  $R^2$ . Таким образом, угол наблюдения положительного препятствия уменьшается как  $1/R$  по мере увеличения дальности, в то время как угол наблюдения отрицательного препятствия уменьшается как  $1/R^2$ .

Теперь мы свяжем требуемое расстояние  $R$  обнаружения препятствия со скоростью движения платформы  $v$ . Чтобы иметь возможность остановиться перед столкновением с препятствием, расстояние до него должно быть не меньше  $R$ , которое вычисляется следующим образом: определяем ускорение торможения за счёт трения:  $a = mg \mu / m = g \mu = v / T$ ; тогда расстояние, пройденное при торможении с ускорением  $a$ :  $R_o = a T^2 / 2 = 0.5 a (v / g \mu)^2 = 0.5 g \mu v^2 / (g \mu)^2$ , а общее пройденное расстояние до остановки:

$$R = R_o + v T_R + B \text{ или } R = v^2 / (2 g \mu) + v T_R + B,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения между колесами и землей,  $g$  — ускорение свободного падения,  $T_R$  — общее время реакции до начала торможения,  $T$  — время торможения, а  $B$  — буферное расстояние, используемое для обеспечения безопасности.

Для примера, типичные значения этих параметров для внедорожной езды составляют около  $\mu = 0,65$ ,  $T_R = 0,25$  с,  $B = 2$  м,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>. При этих значениях квадратичный член начинает доминировать, когда  $v > 3,2$  м/с, что составляет около 11,5 км/ч (в этом случае  $R > 3,6$  м). Таким образом, выше этой скорости  $\theta_p$  будет больше  $1/v^2$ , а  $\theta_n$  будет порядка  $1/v^4$ .

#### 4. Предлагаемый подход к обнаружению препятствий

Радиолокационные методы могут обнаруживать изменения в дифракционной картине, интерференции, наложении и отражении волн и, таким образом, могут быть использованы для обнаружения резких провалов. Если длины волн таких излучений соизмеримы с характерными размерами особенностей рельефа, связанных с отрицательными препятствиями, то на таких особенностях может возникать значительное количество дифракционных, интерференционных эффектов, которые могут быть обнаружены.

Когда радар активен, мы знаем, какова частота (или спектр) излучаемой волны, потому что мы сами формируем это излучение, при этом спектр стабилен или изменяется в соответствии с заданным законом. Если мы передаем непрерывное излучение и настраиваем приемник на возвращающуюся волну, то обе волны можно сравнить в реальном времени аналоговым образом, реализовав несколько простых математических операций. По сути, этот подход заключается в том, чтобы оценить, как исказился исходный спектр



передаваемой волны после того, как она достигла цели и вернулась обратно в приемник. Аналоговый метод является наиболее быстрым способом обнаружения таких искажений. Частота, амплитуда и фаза — три параметра, которые мы будем отслеживать при таком сравнении. Очевидно, что, когда излучаемая волна достигает цели и возвращается в приемник, ее частота, амплитуда и фаза отличаются от передающих из-за эффектов дифракции и интерференции волн.

Когда две волны, близкие по частоте, попадают в смеситель или умножитель, чередование синфазных и противофазных колебаний выражается в периодическом уменьшении и увеличении амплитуды суммарного сигнала, возникают «биения» (это хорошо известно). Частота биений пропорциональна абсолютной величине разности частот двух волн (рис. 6).

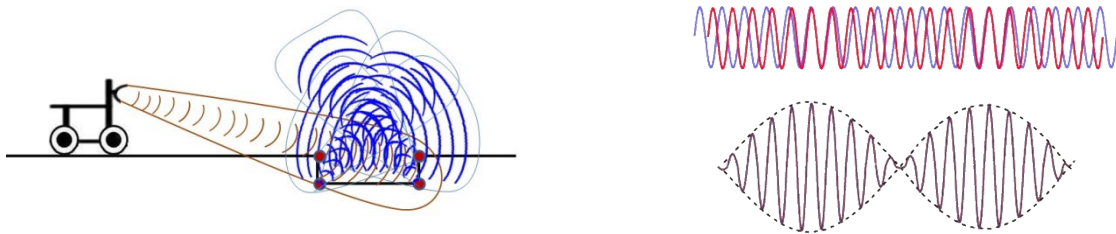


Рис. 6. Определение частоты биений

При наложении двух волн разной частоты получаются компоненты суммы и разности двух частот. Для синусоидальных волн равной амплитуды получаем:  $\cos f_1 + \cos f_2 = 2 \cos 0.5 (f_1 - f_2) \cos 0.5 (f_1 + f_2)$ . Первый член определяет частоту биений  $f_b = |f_1 - f_2|$ . Так упрощенно можно представить работу суммирующего смесителя. Если применить умножитель, то результат будет аналогичным:  $\cos f_1 \cos f_2 = 0.5 [ \cos 2 (f_1 - f_2) + \cos 2 (f_1 + f_2) ]$ . Первый член даст биения с частотой, равной разности частот между умноженными волнами.

Значит, после соответствующих аналоговых операций появятся биения во вполне определенном диапазоне частот. Поэтому предлагается реализовать фильтр (низкочастотный или полосовой) для выявления частотной составляющей, представляющей интерес. Увеличение амплитуды колебаний на выходе такого фильтра можно рассматривать как обнаружение соответствующей разности частот, что означает:

- регистрацию отраженной или рассеянной волны на каком-то препятствии;
- изменение спектра отраженной волны в отличие от излученной при движении платформы вблизи препятствия.

*Примечание.* В приведенных соображениях был сделан акцент на применении радара с непрерывным излучением. Как упоминалось выше, для регистрации биений от микширования излученной и отраженной волн необходимо движение либо препятствия, либо датчика. Иными словами, если препятствие присутствует, но движения не происходит, мы не получим никакой разницы между излученными и принятыми частотами колебаний, а значит —

не получим биений. А это, в свою очередь, означает, что частотный метод использования непрерывного излучения требует либо реального движения, либо искусственной имитации доплеровского изменения частоты. Во втором случае мы можем уже не двигаться, но при этом получать частоту биений, которая пропорциональна расстоянию до цели. Такое применение часто встречается в радарной технике.

## **5. Частотная модуляция в радиолокационном измерении расстояния**

Сравнение частот пары сигналов получается значительно точнее, чем хронометрирование сигнала в случае радиоволн, распространяющихся со скоростью света. Измеряя частоту возвращенного частотно модулированного сигнала и сравнивая ее с оригиналом, можно измерить разницу, выделяя частоты биений и используя аналоговый смеситель или умножитель. Преимуществом перед доплеровским радаром в данном случае является то, что для возврата волны требуется наличие препятствия, а вот движение платформы не обязательно. Таким образом, частотная модуляция (ЧМ) заменяет движение. Результирующая частота биений, когда излученные и принятые волны смешиваются, в данном случае пропорциональна расстоянию до препятствия.

Эта техника может быть использована в радарх с непрерывным излучением и часто встречается в авиационных радиолокационных высотомерах. В этих системах «несущий» радарный сигнал частотно модулируется определенным образом, как правило, пилообразно на звуковых частотах. Затем сигнал посылается от передатчика и принимается обратно при отражении от препятствия. Сигналы непрерывно сравниваются с помощью модулятора частоты биений, который производит тон звуковой частоты из возвращенного и части переданного сигнала. Поскольку частота сигнала меняется, к моменту возвращения сигнала в приемник частота передаваемого сигнала уже изменилась. Величина сдвига частоты используется для измерения расстояния. Модуляции, накладывающиеся на принимаемый сигнал, пропорциональны временной задержке; величина сдвига частоты становится больше прямо пропорционально пройденному волной расстоянию.

Такая обработка сигналов похожа на ту, что используется в доплеровском радаре для определения скорости, который является радаром непрерывных волн, но реагирует только на движение.

Отсюда можно сделать вывод, что измерение сдвига частоты сигнала, который постоянно изменяется по частоте вокруг фиксированного эталона, может использоваться для обнаружения неподвижных объектов и измерять дальность до них. В таком частотно-модулированном радаре непрерывного излучения частота обычно изменяется линейно, так что происходит пилообразное изменение частоты (рис. 7).

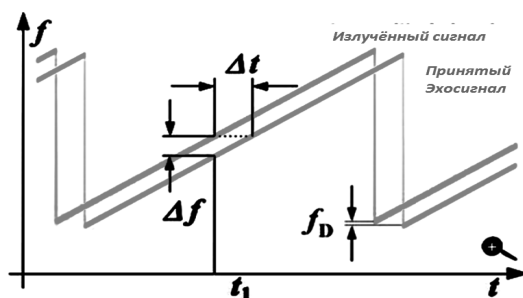


Рис. 7. Измерение дальности частотно-модулированной радарной системой непрерывного излучения

Если частота постоянно меняется со временем, то частота эхо-сигнала будет отличаться от переданной и разница  $\Delta f$  будет пропорциональна времени от излучения до приема  $\Delta t$ , а значит, и дальности  $R$  до цели. Когда получено отражение, частоты могут быть исследованы и, сравнивая полученный эхо-сигнал с фактическим шагом излученной частоты, мы можем выполнить расчет дальности, аналогичный импульсному методу измерения расстояния:

$$R = 0.5 C \Delta t = 0.5 C \Delta f / df/dt,$$

где  $C$  — скорость света =  $3 \times 10^8$  м/с;  $\Delta t$  — измеренная временная задержка (с);  $R$  — дальность до цели (м);  $df/dt$  — производная от функции частоты (тангенс угла, смещение частоты передатчика в единицу времени, что очевидно из рис. 7).

## 6. Фазовое кодирование сигналов

Фазо-кодированные (ФК) формы волны отличаются от частотно-модулированных (ЧМ) форм тем, что непрерывное излучение (или короткие периодические сигналы, соответствующие по длительности, например,  $14 \times M$ , периодам основной частоты, где  $M=1,2,\dots$ ) подразделяется на несколько более коротких субимпульсов. Как правило, каждому такому импульсу соответствует информационная ячейка в диапазоне излучения. Субимпульсы имеют одинаковую временную длительность ( $M$  периодов основной частоты излученного сигнала); каждый передается с определенной фазой. Фаза каждого субимпульса выбирается в соответствии с фазовым кодом. Наиболее широко используемым типом фазового кодирования является двоичное кодирование.

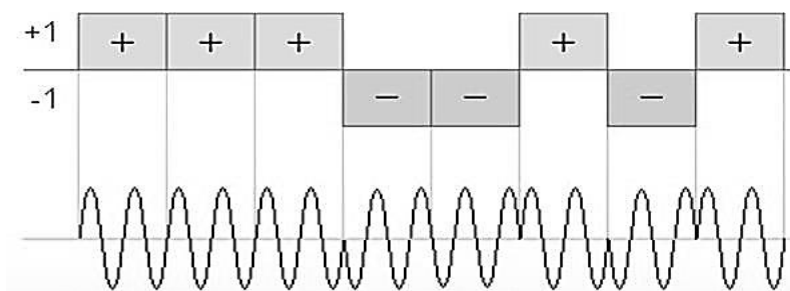


Рис. 8. Диаграмма сжатия импульса с фазовым кодированием при  $M=2$

Двоичный код состоит из последовательности элементов +1 и -1. Фаза передаваемых субимпульсов устанавливается  $0^\circ$  или  $180^\circ$  в соответствии с последовательностью элементов в фазовом коде, как показано на рисунке 8. Поскольку передаваемая частота может быть не кратна обратной величине ширины субимпульса, тогда кодированный сигнал является прерывистым в точках фазового разворота.

Выбор случайных фаз  $[0 \text{ или } \pi]$  является критическим. Особым классом двоичных кодов являются оптимальные баркеровские коды. Они оптимальны в том смысле, что обеспечивают небольшие боковые лепестки, которые все имеют одинаковую величину. Существует лишь небольшое количество таких оптимальных кодов. Они показаны в таблице на рис. 9.

Длина кода N	Код Баркера		Пиковый уровень боковых лепестков [15][16]
2	+1 -1	+1 +1	-6 dB
3	+1 +1 -1		-9.5 dB
4	+1 +1 -1 +1	+1 +1 +1 -1	-12 dB
5	+1 +1 +1 -1 +1		-14 dB
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1		-16.9 dB
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1		-20.8 dB
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1		-22.3 dB

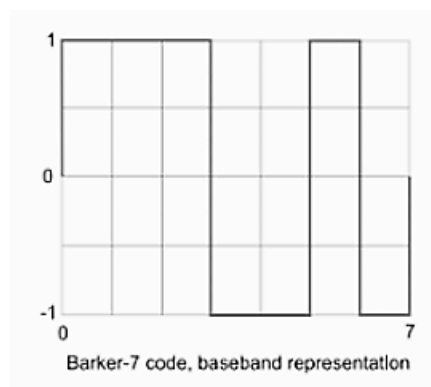
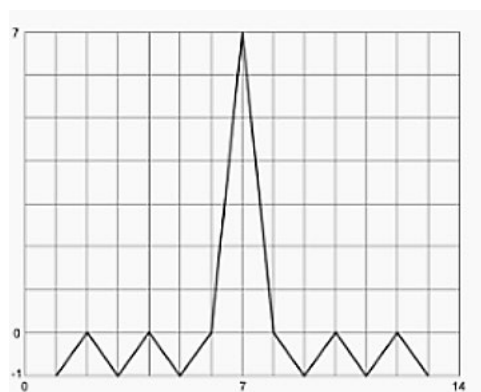


Рис. 9. Таблица известных кодов Баркера для импульсов с фазовым кодированием и пример кода длины 7 (условная графика) и его автокорреляционная функция (внизу, слева)

Компьютерное исследование выполнило поиск кодов Баркера длительностью до 6000 и получило только 13 в качестве максимального значения количества субимпульсов, что является довольно низким показателем. Уровень боковых лепестков в этом случае составляет -22,3 дБ. Уровень амплитуды боковых лепестков кодов Баркера равен  $1/N$  пикового сигнала, где N — длина кода, количество субимпульсов в [14-15].

Код Баркера — это один из двоичных фазовых кодов, который генерирует сжатую форму сигнала с постоянным уровнем боковых лепестков.

Коэффициенты автокорреляции в этом случае получаются малыми [14]:

$$C_k = \sum_{i=1}^{N-k} b_i b_{i+k} \leq 1. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $b_i = \pm 1$  является элементом кода Баркера  $BN$ ,  $N$  — длина кода,  $N \geq 2$  при  $1 \leq k < N$ . Существуют коды Баркера длиной 2, 3, 4, 5, 7, 11 и 13, и предполагается, что кода Баркера большей длины не существует [14]. Оптимальной двоичной последовательностью является та, в которой боковой лепесток автокорреляционного пика является минимально возможным для данной длины кода. Преимущество заключается в том, что автокорреляционная или согласованная фильтрация этих кодов дает пик основного лепестка, равный  $N$ , а минимальный боковой лепесток пика равен 1. На рис. 9 перечислены все известные коды Баркера и уровень боковых лепестков этих кодов.

В идеале, при наличии большой длины, эти коды можно использовать для радиолокатора сжатия импульсов. Однако наибольшая известная длина кода Баркера равна 13, поэтому для радара импульсного сжатия, использующего эти коды Баркера, максимальная степень сжатия будет ограничена значением 13. На рисунке 1 показаны 5-разрядный код Баркера и результат сжатия после соответствующего фильтра. Можно видеть, что частотные характеристики согласованного фильтра в точности совпадают с входным сигналом, а частотные характеристики сигнала сжатия практически не изменяются. Код Баркера обладает хорошими характеристиками подавления бокового лепестка автокорреляции. Из-за свойства кода Баркера, которое может улучшать SNR, он рассматривается в качестве передающего кода для низковольтного ультразвукового устройства.

## 7. Демонстрационные эксперименты

Были реализованы и протестированы три различных доплеровских детектора движения, установленные на одну платформу (рис. 10):

- доплеровский бистатический сонар ( $f=40$  КГц;  $\lambda=0,825$  см);
- доплеровский трансивер X-диапазона (10.5 ГГц  $\lambda=2,86$  см);
- доплеровский трансивер K-диапазона (24 ГГц  $\lambda=1,25$  см).

После серии испытаний мы оставили только один датчик для дальнейшего исследования, модификации, установки на мобильные роботы и развития - доплеровский радар X-Band ( $f=10.5$  ГГц,  $\lambda=2.86$  см).

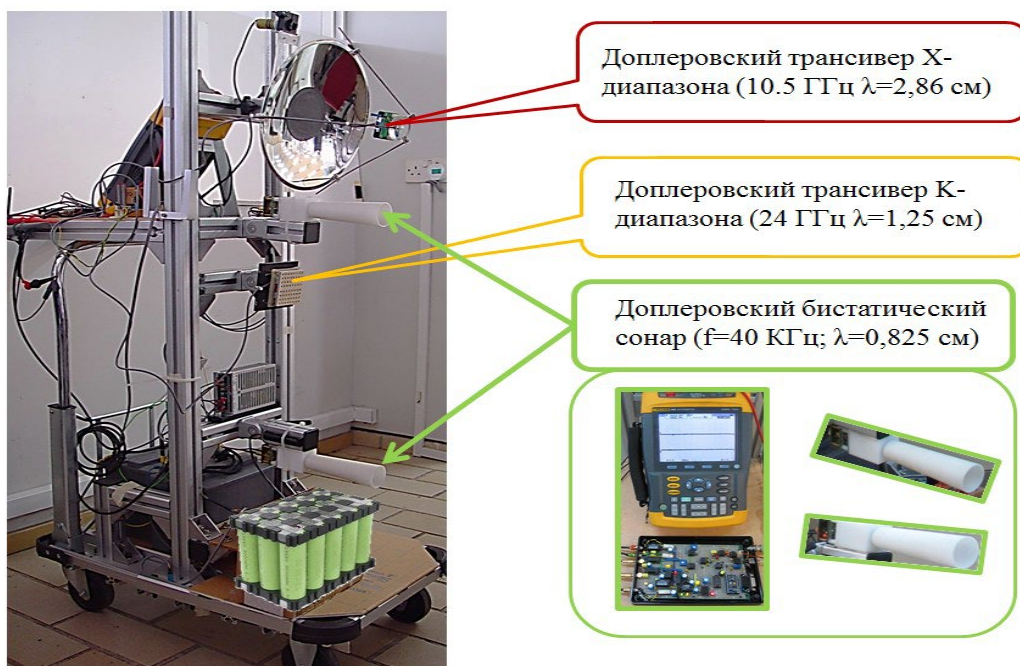


Рис. 10. Платформа для тестирования и сравнения трех доплеровских датчиков движения

Подход заключается в следующем: если бы основной лепесток луча радара был горизонтальным или слегка наклоненным вниз, то энергия, отраженная от близлежащего отрицательного препятствия, отличалась бы от энергии, отраженной от земли на том же расстоянии от движущейся платформы. Однако датчики, имеющие длину волны около 1 см, оказались слишком чувствительными и давали слишком много ложных срабатываний от незначительных выбоин. Только узкая диаграмма направленности радиоволн  $f=10.5$  ГГц ( $\lambda=2.86$  см) обеспечила удовлетворительную дискриминацию между ровной асфальтовой дорогой и выбоинами, в которые действительно может попасть и застрять колесо движущейся платформы. Она может «почувствовать» эту разницу. Обнаружение такой разницы является целью данного проекта. Физически это означает, что только излучение с длиной волны 2.86 см сопоставимо с характерными размерами особенностей рельефа, связанных с отрицательным препятствием, и на таких особенностях возникают значительная дифракция и помехи, которые могут быть восприняты излучением в X-диапазоне. Колебания с меньшей длиной волны (0,825 см и 1,25 см) оказались слишком чувствительными к участкам дороги, не представляющим опасности для колес платформы. Нам не требуется обнаруживать такие препятствия.

Оказалось, что система обнаружения, основанная на передаче непрерывной волны и выделении изменения частоты (в случае получения отклика) и на анти-помеховой аналоговой обработке, имеет существенные преимущества по сравнению с системой, основанной на измерениях изменений

амплитуды или фазы. Скорость работы в этом случае определяется только скоростью распространения волн в окружающей среде, а также скоростью работы аналоговых микросхем, которые достаточно быстрые.

Наш доплеровский детектор движения непрерывно передает и принимает колебания и пытается выделить частоту биений. Излученные и принятые колебания перемножаются, полосовой фильтр служит частотным регулятором, амплитуда которого контролируется, а частота колебаний пропорциональна скорости движения и может быть измерена для получения значения скорости. Пример выделения Доплер-биений представлен на рис. 11.

Частота доплеровского сдвига пропорциональна скорости движения и определяется уравнением

$$\Delta f = \frac{2f_o V_s}{C} \cos \theta ,$$

где  $\Delta f$  — доплеровская частота;  
 $V_s$  — скорость движения объекта;  
 $f_o$  — частота излучения;  
 $C$  — скорость света  $3 \times 10^8$  м/с;  
 $\theta$  — угол направления движения.

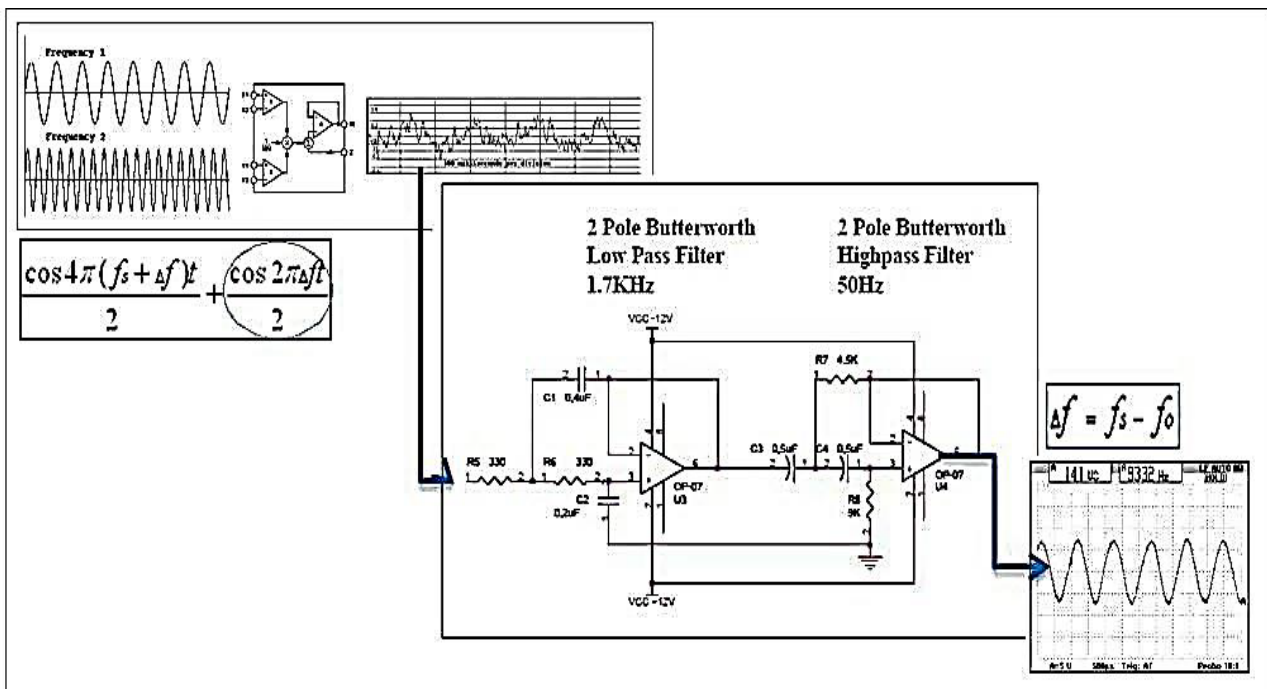


Рис. 11. Частота биений, полученная в результате умножения переданного и принятого сигналов с помощью 2-полюсного полосового фильтра Баттерворта

Поскольку детектор движения способен измерять скорость этого движения, то биение доплеровских колебаний появляется на выходе этого фильтра только тогда, когда датчик или препятствие движутся и при этом переданная волна возвращается обратно в приемник. Мы решили использовать эту особенность для определения отрицательных препятствий на дороге перед



движущейся платформой. Диаграмма направленности излучения доплеровского радара X-диапазона была сужена и ослаблена так, чтобы получившийся узкий луч стал эффективным в пределах ~15-20 метров перед движущейся платформой. За счёт малого наклона вниз радар облучал пятном поверхность по ходу движения на расстоянии 8-15 метров перед движущейся платформой.

В большинстве случаев такой угол наклона  $\theta$  не приводил к появлению эхосигнала от ровной пустой дороги. В случае отрицательного или положительного препятствия появляется возвратный сигнал, который умножается с излученным сигналом и на выходе фильтра появляются доплеровские биения. Амплитуда этих биений — то, что мы используем в качестве признака наличия препятствия.

Первоначально было невозможно определить тип препятствий. Это могли быть выбоины, кирпич на дороге, другой автомобиль, стена здания. Что можно определить, так это то, что все возможные обнаруженные препятствия находятся на расстоянии 8-10 м впереди и в пределах ширины луча, образуя конический пространственный коридор ( $7^\circ$ ) перед подвижной платформой (рис. 12).

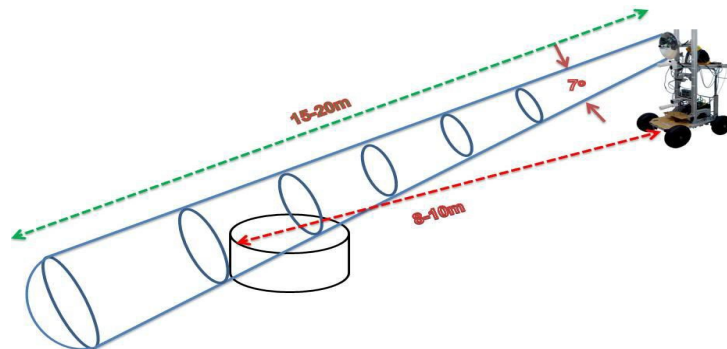


Рис. 12. Доплеровский детектор движения X-диапазона, установленный на колесной мобильной платформе с ручным приводом, обнаруживает выбоины с расстояния 8-15 м в пространстве конуса  $7^\circ$

Автоматического предупреждения о наличии препятствия в реальном времени и быстрого определения значения скорости может быть достаточно, чтобы снизить скорость и направление движения платформы и, таким образом, избежать столкновения с препятствием. Применение другой модальности зондирования может компенсировать этот недостаток. Преимуществом данного подхода является работа в реальном времени, скорость которой определяется в основном скоростью распространения волн в окружающей среде, а также скоростью работы реализованных аналоговых микросхем.

*Устранение недостатков.* Проблема, с которой пришлось столкнуться при реализации данного проекта, заключалась в отсутствии подходящего испытательного полигона. Доступные места тестирования с отрицательными препятствиями ограничивали не только масштаб экспериментов, но также надежность и полноту оценки экспериментальных результатов по обнаружению отрицательных препятствий.



Первоначально чрезмерное отражение радиочастотных сигналов от пола, стен и окружающей инфраструктуры на испытательном полигоне вносило значительную погрешность в экспериментальные результаты, влияя на точность измерений. Этот вид помех был существенным для экспериментов с радиочастотным детектором из-за его большой дальности обнаружения (~76 м).

Специальный поглощающий материал для 10.5 ГГц был наклеен на поверхность параболического отражателя для уменьшения площади отражающей поверхности, которая пропорциональна интенсивности распространяющейся волны и, следовательно, дальности действия датчика. Лазерная указка была прикреплена вдоль фокальной линии тарелки для визуальной геометрической настройки (рис. 13с).

## 8. Эксплуатация, модификация и тестирование

Данный X-Band трансивер является доплеровским детектором движения, который продается как компонент для создания конечного продукта (OEM). Он коммерчески доступен для приобретения у компании Parallax для роботизированных приложений и также может быть использован в системах безопасности, для автоматически открывающихся дверей, может обнаруживать движения в комнате, во дворе или даже по другую сторону стены.

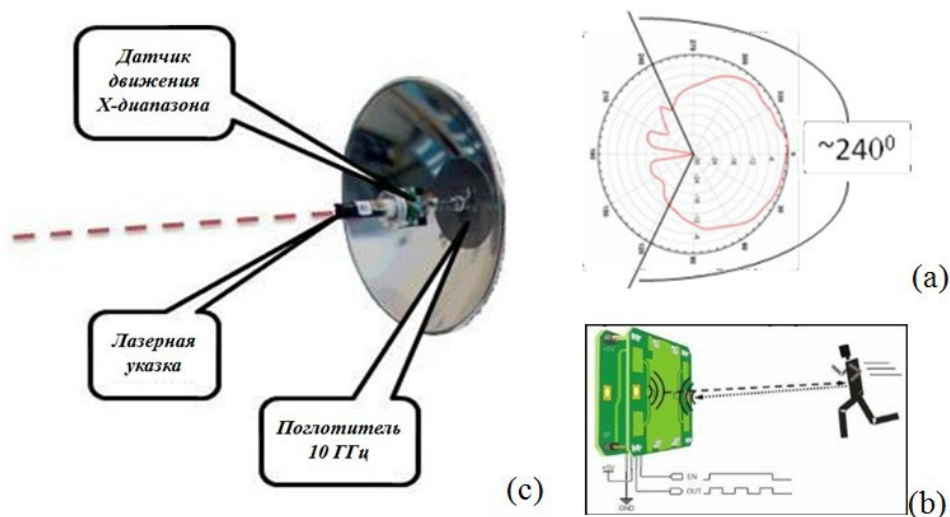


Рис. 13. Изначальная диаграмма направленности (а) и параболическая антенна с доплеровским детектором (б) движения X-диапазона в фокальной точке, лазерным указателем вдоль фокальной линии и поглотителем на отражающей поверхности (с)

Как отмечалось, этот доплеровский детектор работает в X-диапазоне на частоте 10,525 ГГц, что соответствует передаваемым радиочастотным (РЧ) колебаниям (длина волны 2.86 см). Чувствительность регулируется вручную с помощью потенциометра, обеспечивая обнаружение в прямой видимости на

расстоянии от ~2,4 до 9+ метров. На передней панели устройства находится антенная печатная плата (рис. 13b) — поверхность печатной платы с передающей и приемной антеннами модуля. Устройство должно быть ориентировано так, чтобы поверхность его антенны была обращена к зоне обнаружения, которая довольно велика по углу обзора, так как диаграмма направленности этого датчика по умолчанию составляет ~240 градусов (рис. 13a). Но для обнаружения препятствий потребовалась очень узкая диаграмма направленности излучения, поэтому был применен параболический отражатель.

## 9. Расчет параболического отражателя

Расчет параметров параболического отражателя (антенны-тарелки) дал следующие результаты (рис. 14).

Пусть  $D$  — диаметр тарелки,  $d$  — глубина тарелки и  $f$  — фокусное расстояние. Точка  $(0.5 D, d)$  — фокус параболы,  $d = (0.5 D) / 4 f$ , тогда получаем зависимость между диаметром  $D$ , глубиной  $d$  и фокусным расстоянием  $f$  тарелки:  $f = D^2 / 16d$ .

Коэффициент освещенности: 0,600

Рабочая частота: 10525 МГц

Диаметр рефлектора: 30 см

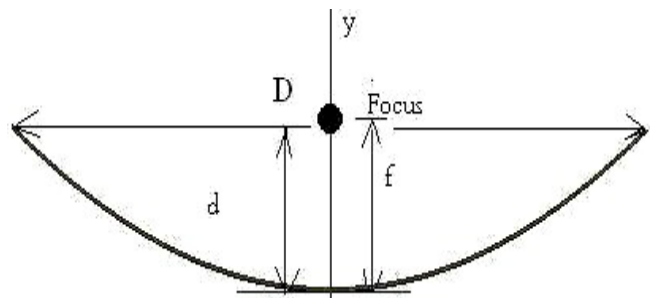


Рис. 14. Расчет параметров параболического отражателя

Конечно, на практике форма антенны не является идеальной параболой, и поэтому при размещении антенны требуются небольшие корректировки.

В предположении Гюйгенса каждая точка, до которой доходит световое возмущение, становится источником сферической волны, и сумма этих вторичных волн определяет дифракционную картину в любой последующий момент времени. Любое возмущение, созданное в достаточно малой области изотропного пространства, распространяется из этой области во всех радиальных направлениях. Суперпозиция всех волн приводит к наблюдаемой картине распространения волн.

Рассмотрим, как можно сузить диаграмму направленности излучения нашего радара. Диаметр датчика, включая передающую и приемную антенны, составляет ~6 см (см. рис. 15), датчик рассмотрим как точечный источник излучения при размещении его в фокусе параболического отражателя диаметром 30 см (рис. 15). Параболическая отражающая поверхность становится источником почти параллельных вторичных волн, составляющих диаграмму направленности менее 7 градусов. Область под

6-сантиметровым источником отражает волны назад в источник, и потому она была покрыта специальным поглотителем излучения.

Параболический отражатель выбран таким образом, чтобы его глубина была близка к фокусному расстоянию (7,62 см ~ 7,382 см). Учитывая широкую диаграмму направленности доплеровского радара (не менее 180 градусов), было необходимо разместить его на глубине, не превышающей края параболической тарелки. В этом случае все возможные суперпозиции передающих и принимающих волн будут происходить в основном внутри объема тарелки и, таким образом, ширина диаграммы направленности не выйдет за края отражателя и будет сформирован узкий луч.

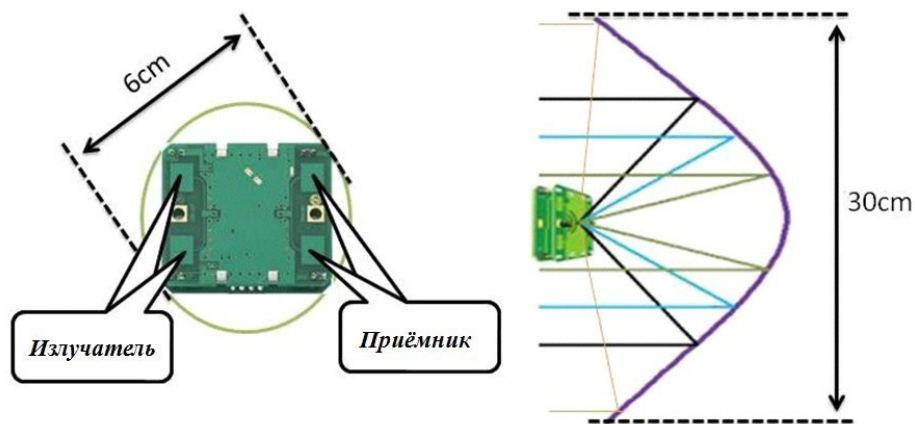


Рис. 15. Соотношение размеров доплеровского датчика (слева) и параболической антенны

Эта область облучения делится на несколько зон: геометрическое поле, ближнее поле, поле Френеля и дальнее поле (рис. 16), см. также работу [20].

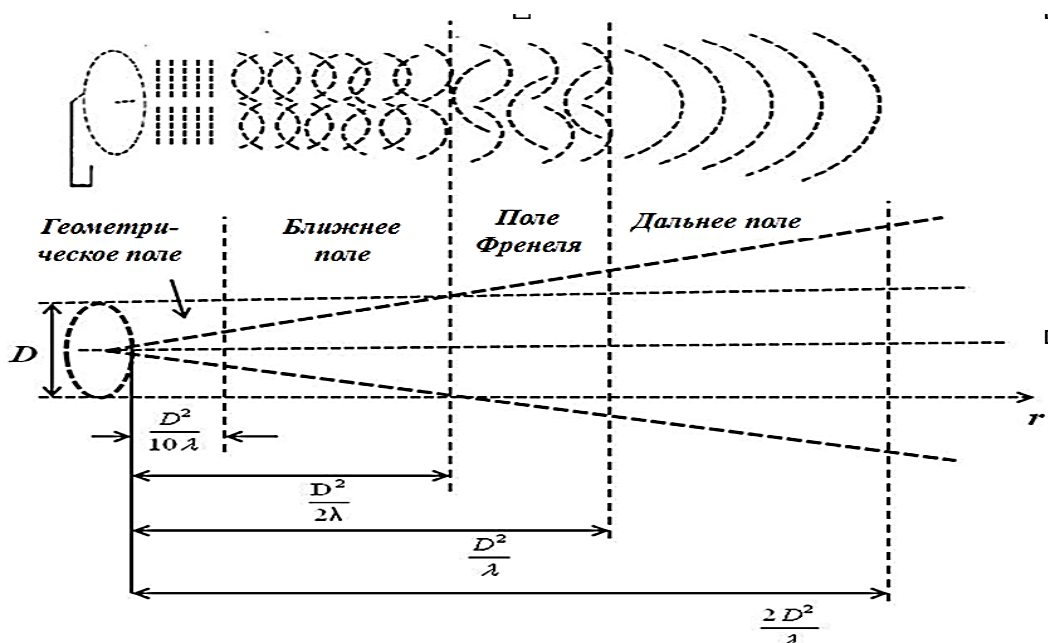


Рис. 16. Электромагнитное излучение передающей антенны

На близких расстояниях от антенны, где  $\lambda < r < D^2/2\lambda$ , фазовый синхронизм волнового фронта еще не нарушен, и поведение волны соответствует плоской волне. Это область геометрической оптики, или так называемый проецирующий луч, в котором сосредоточено почти все излучение антенны. Затем в диапазоне до  $r \sim D^2/\lambda$  происходит существенный разрыв фазового синхронизма, сопровождающийся резкими пространственными колебаниями амплитуд поля. Далее располагается промежуточное поле Френеля, каждая точка которого соответствует нескольким зонам Френеля, укладывающимся в апертуру антенны. Наконец, при  $r \gg D^2/\lambda$  волновой фронт можно считать уже сферическим, флуктуации амплитуды колебаний в направлении главного направления распространения волны практически исчезают. Это дальнее поле, в котором размер первой зоны Френеля становится больше апертуры антенны и где можно работать с регулярной диаграммой направленности (амплитуда поля зависит только от угловых координат).

Коэффициент усиления антенны обычно указывается в изотропных децибелах (dBi). Это коэффициент усиления мощности по сравнению с изотропной антенной (антенной, которая распространяет энергию во всех направлениях с одинаковой мощностью, что является теоретическим представлением, так как в реальности не существует). Чем больше коэффициент усиления антенны, тем больше ее «направленность» (энергия поступает в предпочтительном направлении). Коэффициент усиления антенны одинаков для передачи и приема. Параболический рефлектор не зависит от частоты, он влияет только на коэффициент усиления антенны. Это означает, что мы можем использовать параболическую антенну как для света, так и для других электромагнитных волн. Чем выше коэффициент усиления, тем выше направленность и тем точнее она должна быть направлена.

В нашем случае параболическая антенна диаметром 30 см имеет коэффициент усиления = 31,6. Поэтому геометрическое поле = 0,3 м, ближнее поле = 1,5 м, поле Френеля = 3 м, дальнее поле = 6 м (указаны дальние границы). Соответственно, диапазон дальности работы при облучении на частоте 10,525 ГГц увеличивается в 31,6 раз (Gain 30Dbi  $\sim$  31,6 раз). Примененный детектор движения OEM имеет максимальный диапазон срабатывания до 2,4 м, когда регулятор чувствительности установлен на минимальное значение. Поэтому, учитывая усиление параболической антенны, минимальная дальность должна составлять не менее  $\sim$ 76 м. Однако можно варьировать дальность действия датчика, помещая слой поглощающего материала вокруг центра и вдоль края, поскольку нам нужен только 15-20-метровый диапазон.

Идея в том, что коэффициент усиления  $G$  мощности излучения параболической антенны пропорционален величине эффективной площади поверхности рефлектора  $S_{ef}$  и обратно пропорционален длине волны  $\lambda$ . В частности,

$$G = \frac{4\pi S_{ef}}{\lambda^2} \quad S_{ef} = \frac{\eta\pi D^2}{4}$$

где  $\eta$  — эффективность использования поверхности рефлектора, показывающая долю мощности, которая была принята поверхностью антенны и отражена в пространство. В нашем случае  $D = 30\text{ см}$ ;  $\eta = 1,3$ . Тогда  $S_{ef} = 918\text{ см}^2$ . При коэффициенте усиления  $G = 31,6$  и  $\lambda = 3\text{ см}$  мы имеем дальность  $r \sim 76\text{ м}$ . Если мы хотим, чтобы дальность была  $r \sim 15\text{ м}$ , тогда мы должны уменьшить  $S_{ef}$  с  $918\text{ см}^2$  до  $75\text{ см}^2$ . Специальный поглощающий материал для электромагнитного излучения 10.5 ГГц был применен для частичного покрытия отражающей поверхности параболической антенны, чтобы уменьшить ее коэффициент усиления и, тем самым, сократить дальность действия до 15-20 м (см. рис. 17 для различных вариантов размещения поглотителя).

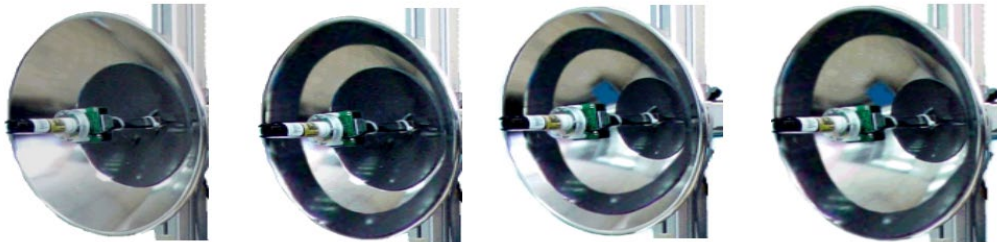


Рис. 17. Поверхность параболической антенны, покрытая поглотителем

Ширина диаграммы направленности ( $j$ , в градусах) может быть приблизительно оценена как

$$j = \frac{69\lambda}{D} = 6.9^\circ$$

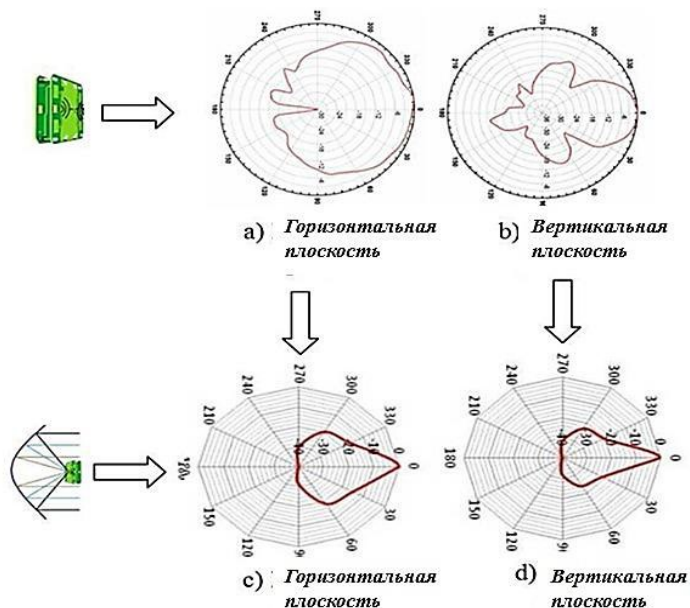


Рис. 18. Диаграммы направленности доплеровского радара (исходная, усиленная и суженная параболической антенной)



Это соответствует предыдущим расчетам угла параболического отражателя. Рис. 18 (а, b) иллюстрирует диаграмму направленности исходного доплеровского детектора в горизонтальной и вертикальной плоскостях: а - горизонтальная плоскость, b – вертикальная плоскость). На рис. 18 (с, d) представлены диаграммы направленности параболической антенны, в фокусе которой был размещен доплеровский детектор.

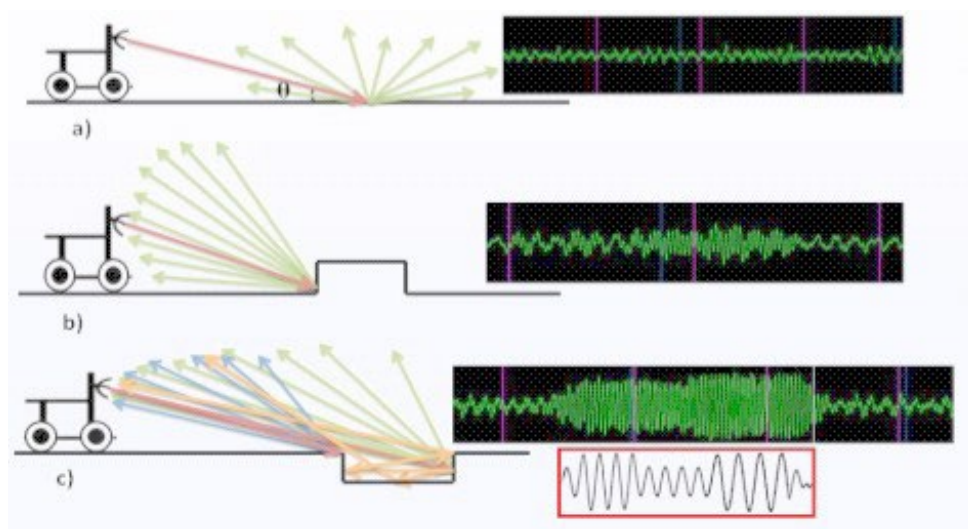
## 10. Эксперименты по обнаружению отрицательных и положительных препятствий

На рис. 19 показано расположение тележки и ямы. Коробки были собраны вместе, чтобы имитировать положительное препятствие почти такого же размера, как и отрицательное препятствие.



a

b



c

Рис. 19. Обнаружение отрицательных и положительных препятствий  
а) в помещении; б) на улице; в) примеры Доплер-биений

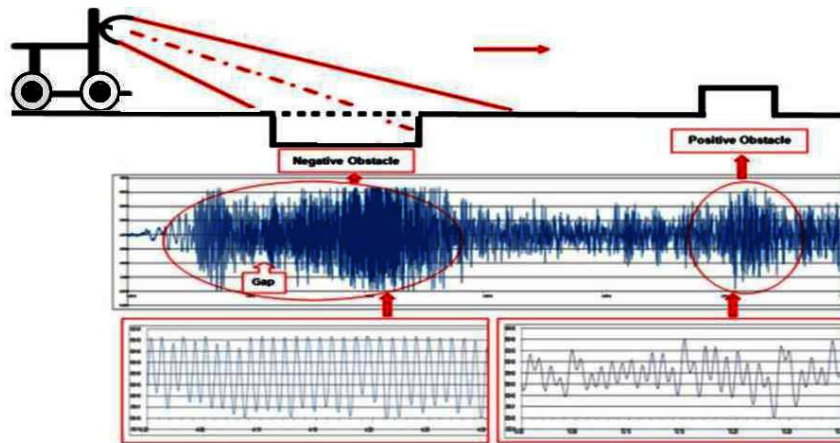


Рис. 20. Частота биений при обнаружении отрицательного и положительного препятствий

Из приведенных графиков видно, что появление и всплеск частоты биений в ответ на отрицательное препятствие подтверждают целесообразность использования метода радиочастотной доплерографии для обнаружения отрицательных препятствий. Проанализировав значение и графическую картину частоты биений X-диапазона, мы выявили 3 отличительные особенности между частотой биений при обнаружении положительных и отрицательных препятствий:

- Амплитуда частоты биений, возрастающая при обнаружении отрицательных препятствий, имеет разрыв (рис. 20) в середине, в то время как частота биений при обнаружении положительных препятствий является непрерывной.
- Частота биений при обнаружении отрицательных препятствий в целом ниже, чем при обнаружении положительных препятствий. При одинаковых экспериментальных условиях (когда скорость детектора движения составляла 1,4 м/с) средняя частота для отрицательного препятствия составляет около 94,58 Гц, в то время как для положительного препятствия — около 100,54 Гц.
- Графическая картина частоты биений при обнаружении отрицательного препятствия намного регулярнее, чем при обнаружении положительного препятствия.
- Эти наблюдения стали подсказкой для алгоритма различения типов препятствий после их обнаружения.
- Предварительные испытания на автостоянке с тележкой с ручным приводом показали многообещающий результат для разработки системы. Ниже показана схема эксперимента, в котором успешно обнаруживалась снятая крышка сливного отверстия.
- Другие эксперименты были проведены после интеграции датчика X-Band в мобильное роботизированное транспортное средство (рис. 21).

Для регистрации Доплер-сигнала от отрицательного препятствия и синхронизации его с видеозаписью была применена видеокамера Sony HDR-XR160 HD Hard Drive Camcorder с внешним микрофонным входом и лазерной указкой, направленные соосно с параболическим рефлектором. Поскольку частоты Доплер-биений находятся в диапазоне частот звуковой дорожки камеры, они на нее успешно регистрировались синхронно с видеоизображением при приближении к отрицательному препятствию.

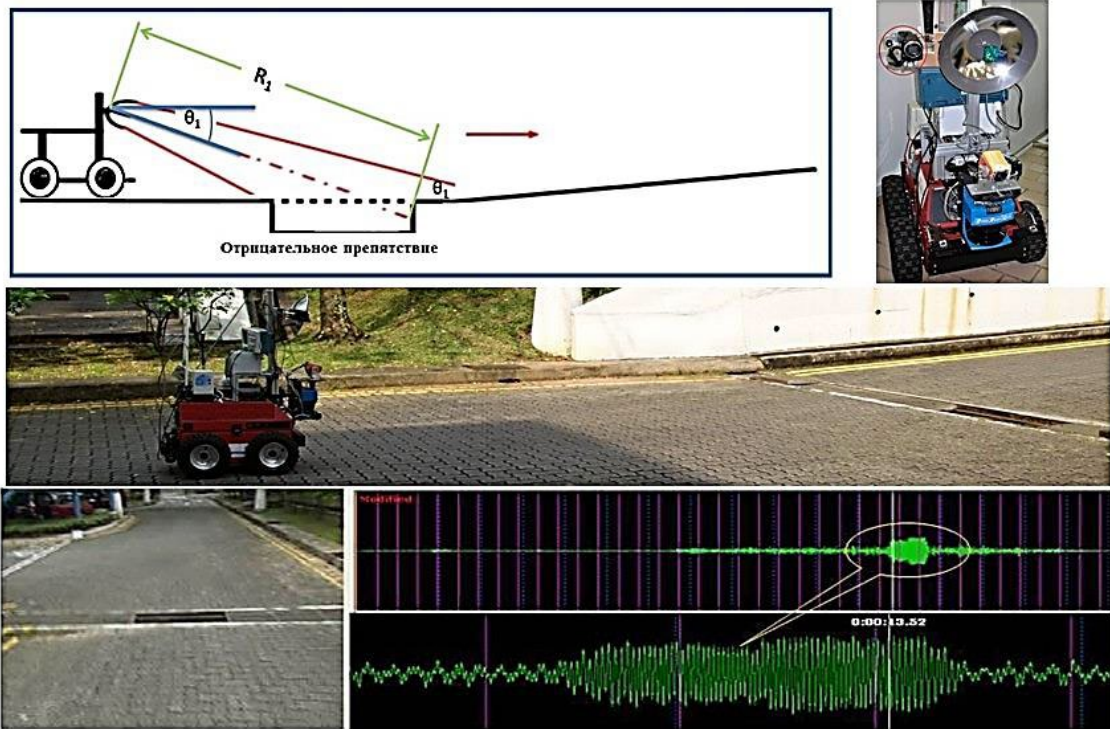


Рис. 21. Регистрация отрицательного препятствия с помощью Видеокамеры и Доплер-радара

## 11. Дальнейшая работа

*Развитие программно-аппаратного способа идентификации препятствий.* Хорошо известно проявление эффекта Доплера - мы слышим высокий звук от сирены приближающегося поезда, а когда поезд проезжает мимо нас, его высота резко падает. Аналогично длина волны, отраженной от препятствия, также смещается. В нашем случае очевидно следующее (рис. 22):



Рис. 22. Известная иллюстрация смещения Доплер-частоты в зависимости от направления движения



- если радар движется в направлении препятствия, то доплеровская частота смещается в сторону более коротких длин волн и более высокой частоты;
- если платформа с радаром удаляется от препятствия, то доплеровская частота смещается в сторону более длинных волн и более низкой частоты;
- величина сдвига больше, если излучающий объект движется быстрее.

Сформулируем простой алгоритм идентификации препятствий. Наклоним луч радара так, чтобы приходило небольшое непрерывное отражение от плоской поверхности дороги, и детектировалась доплеровская частота с небольшими колебаниями амплитуды и частоты, так как наша скорость остаётся постоянной (рис. 23).

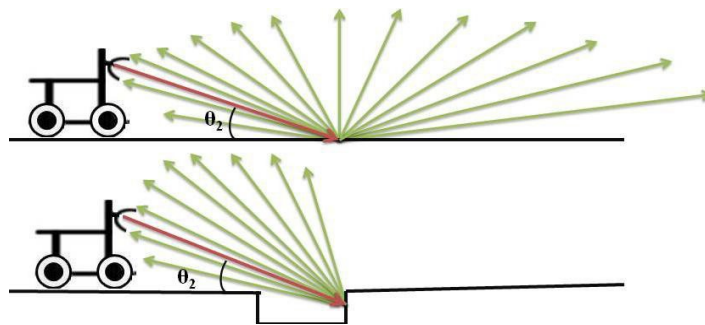


Рис. 23. Рассеяние сигнала на дороге и на препятствии

Когда доплеровский радар «ловит» своим лучом положительное препятствие и оно приближается, доплеровская частота увеличивается. Если наша платформа внезапно остановится, когда препятствие еще находится в поле зрения луча радара, и изменит направление движения, то будет наблюдаться уменьшение частоты биений. Таким образом, если радар сталкивается с протяженным отрицательным препятствием, это будет регистрироваться так же, как если бы он внезапно отступил от препятствия на короткий период, поэтому частота должна стать ниже на этот период времени. А затем, когда задний край выбоины появляется в поле зрения облучающего луча, снова будет регистрироваться приближение, и доплеровская частота снова увеличится.

Это резкое изменение частоты должно происходить в течение короткого промежутка времени и его можно уловить с помощью преобразователя частоты в амплитуду, а также с помощью доплеровского датчика направления и фазы. Эти улучшения алгоритма находятся в стадии разработки. Рис. 24 иллюстрирует этот эффект, когда наличие провала выглядит так, как будто препятствие кратковременно сдвигается.

*Планируемые доработки способа определения направления смещения препятствий.* Доплеровский радар может давать информацию о направлении

движения при добавлении второго умножителя-смесителя, смещенного по фазе приблизительно на  $45^\circ$  по отношению к основному смесителю для обеих частот (как излучаемой, так и принимаемой, рис. 25).

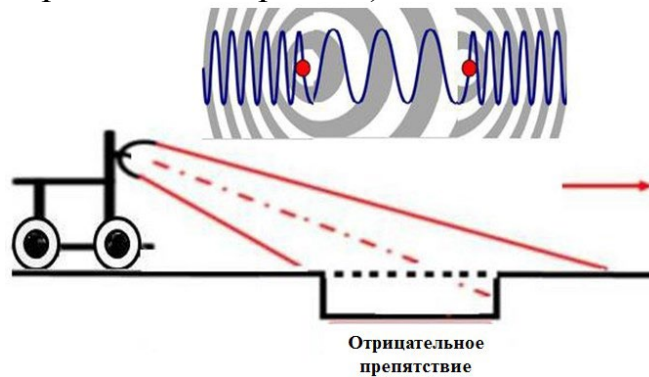


Рис. 24. Изменение доплеровской частоты при наличии провала, как если бы поверхность была сдвинута назад

Выход двух смесителей может быть подан на фазовый компаратор, который измеряет фазовый угол между двумя обнаруженными сигналами. Если цель приближается к радару, сигнал первого смесителя опережает второй, т.е. сдвиг фазы будет положительным. Если цель удаляется, первый смеситель будет отставать от второго.

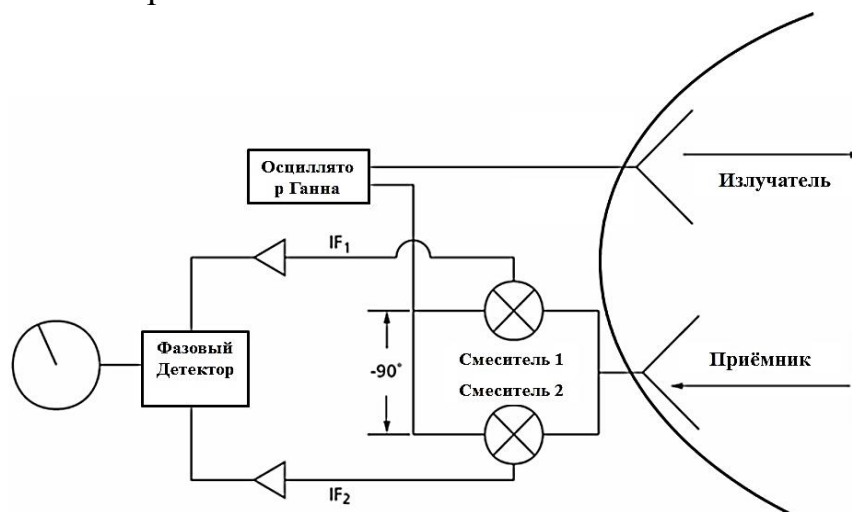


Рис. 25. Фазовый компаратор, измеряющий фазовый угол между двумя обнаруженными сигналами

#### Преобразователь частоты в напряжение.

Такой преобразователь работает по принципу баланса - входной ток сигнала интегрируется входным операционным усилителем и конденсатором, создавая выходное напряжение интегратора с нисходящим темпом. Когда выходное напряжение интегратора достигает порогового значения компаратора, срабатывает однократный импульс. Опорный ток переключается на вход интегратора в течение периода «one-shot», вызывая повышение выходного напряжения интегратора. По окончании периода однократного

срабатывания, интегратор снова переходит в нисходящий режим. Процесс осцилляции приводит к долгосрочному балансу заряда (или среднего тока) между током входного сигнала и опорным током (рис. 26).

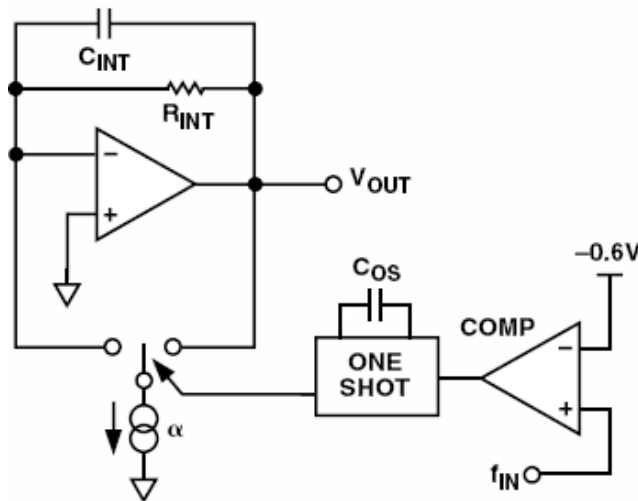


Рис. 26. Функциональная схема преобразователя частоты в напряжение

### Бистатический радар

Планируется создать прототип датчика (рис. 27), в котором вышеупомянутый приемопередатчик будет заменен вариантом бистатического радара, состоящего из двух отдельных рупорных антенн, установленных на разной высоте и направленных в одну и ту же точку дороги перед мобильным роботом на расстоянии не менее 6 метров.

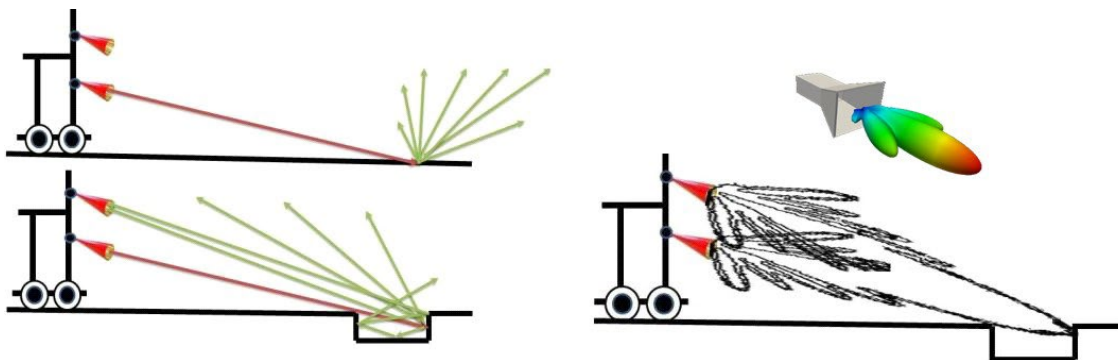


Рис. 27. Иллюстрация работы бистатического радара

Разделение передатчика и приемника обеспечивает исключительную помехоустойчивость. Двухрупорная антенна работает таким образом, что ложные и полезные сигналы не смешиваются, так как у излучаемого и принимаемого сигналов создаётся подобие общего поля-пятна, которое находится и «скользит» только в том месте дороги, куда оно направлено. Даже при сильном влиянии дождя или конденсата на дорогу, а также при наличии боковых лепестков излучателей, не ожидается появления ложных сигналов.

## 12. Заключение

Экспериментальные результаты и анализ, представленные выше, показали, что доплеровский радар является целесообразным и перспективным средством при обнаружении отрицательных препятствий в реальном времени для автономных мобильных платформ. Как показали испытания, появление частоты биений может стать индикатором предупреждения появления опасных отрицательных препятствий по пути движения робота.

Частота доплеровских биений должна дополнительно анализироваться, чтобы имелась возможность отличить отрицательные препятствия от положительных. Отрицательные препятствия способны вызывать более регулярные биения с разрывом в середине, что напоминает возникновение режима установившегося рассеяния в ультразвуковых эхосигналах [18, 19]. Колебания внутри разрыва гораздо более устойчивы, чем по краям. Возможно, что передний край выбоины также производит обратное рассеяние волны, и, таким образом, мы можем иметь дело с суперпозицией переднего, среднего и заднего рассеяния падающей волны на выбоине (см. рис. 28).

Положительное препятствие вызывает менее регулярные, но непрерывные биения. Частота биений при обнаружении отрицательного препятствия немного ниже, чем при обнаружении положительного препятствия.

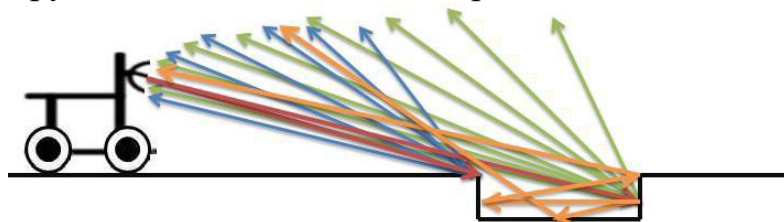


Рис. 28. Суперпозиция волн, рассеянных на выбоине

На гусеничном роботе Амур испытываются два X-диапазонные доплеровские датчики движения (рис. 29).



Рис. 29. Применение разработки для гусеничного робота

*Выводы.* Можно сделать вывод об исключительной полезности применения детектора движения на основе трансивера X-диапазона радиочастотного СВЧ-диапазона (в том числе в дополнение к более традиционным системам технического зрения) и вместе с тем отметить

следующее.

*Преимущества:*

- Скорость радиоволны очень высокая ( $3 \times 10^8$  м/с), что обеспечивает быстрое обнаружение препятствий, особенно на большом расстоянии и при использовании аналоговых способов обработки и детектирования СВЧ-сигналов;
- Диаграмма направленности излучения, изначально широкая и обладающая небольшой дальностью действия (9 м), может быть сужена путем размещения датчика в фокусе параболического отражателя и регулировки его площади отражения с помощью радиопоглощающих материалов, закрепленных на отражателе;
- Таким образом, диапазон работы детектора движения в X-диапазоне можно регулировать;
- Длина волны радиочастотного сигнала составляет около 3 см. Это значение оказалось достаточно хорошим с точки зрения надежности обнаружения выбоин, соответствующих размеру колес робота. Т.е. меньшие ямы не будут вызывать значительную частоту биений из-за незначительного количества отраженных обратно радиочастотных колебаний;
- При этом следует отметить, что для традиционных систем технического зрения (на основе оптики) задача выявления таких препятствий часто практически неразрешима.

*Недостатки:*

- Относительно большой размер параболического отражателя, который необходимо установить на борту; значительная высота крепления параболической антенны;
- Движущаяся антенна производит больше шума при регистрации биений, чем если бы она была закреплена стабильно, а объект двигался;
- Наблюдается дополнительный шум от механических вибраций во время движения, поэтому требуется гибкое крепление антенны на борту;
- Положительное препятствие вызывает менее регулярный, но непрерывный отклик биений доплеровской частоты. Частота биений при обнаружении отрицательных препятствий немного ниже, чем при обнаружении положительных препятствий.

*Благодарности.* Первоначально исследование проводилось В.В. Ястребовым при поддержке НИИ Робототехники (RRC) Технологического Университета NTU в Сингапуре. Работа не была закончена и не была доведена до публикации. Особая благодарность за поддержку выражается директору RRC, профессору Ситу Джиму Ли Джеральду. Позднее исследование было продолжено в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и полученные результаты применены на мобильном роботе серии «Амур».

## Список литературы

- 1 Arturo L. Rankin, Andres Huertas, Larry H. Matthies Nighttime negative obstacle detection for off-road autonomous navigation / Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA, USA 91109 May 2007 DOI:10.1117/12.720513
- 2 Matthies L. and Rankin A., Negative obstacle detection by thermal signature / Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, CA. October 2003. [https://www.researchgate.net/publication/228349225\\_Nighttime\\_negative\\_obstacle\\_detection\\_for\\_off-road\\_autonomous\\_navigation](https://www.researchgate.net/publication/228349225_Nighttime_negative_obstacle_detection_for_off-road_autonomous_navigation) (по состоянию на 18.12.2024)
- 3 Пряничников В.Е., Арыскин А.А., Колесов Ю.С., Ксензенко А.Я., Кувшинов С.В., Плотников А.В., Соловьёва М.Д., Тарасов Р.Б., Тележкин Д.С., Федотов Д.К., Харин К.В., Ястребов В.В. КОМПЛЕКС БАЗОВЫХ СЕНСОРНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ / XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023): материалы мультikonференции (г. Волгоград, 11–15 сентября 2023 г.). В 4 т. Т. 1. Робототехника и мехатроника (РиМ-2023) / редкол.: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград: ВолГТУ, 2023. – 308 с., с. 204-207, ISBN 978-5-9948-4703-9 ISBN 978-5-9948-4704-6 (Т. 1) [https://www.elibrary.ru/query\\_results.asp](https://www.elibrary.ru/query_results.asp)
- 4 Пряничников В.Е., Арыскин А.А., Драчкова А.А., Брундукова К.Э., Власова О.И., Карцева А.А., Колесов Ю.С., Снопков А.В., Соловьёва М.Д., Телегин А.И., Тележкин Д.С., Тихомиров А.Н., Федоров А.В., Федотов Д.К., Ястребов В.В. Эксперименты по расширению функциональных возможностей мобильных сервисных роботов. «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», Сборник тезисов 34-й Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК – ООО «Типография Фурсова», 2023. – 306 с.: ил., с. 34-36, ISBN 978-5-6048032-9-5, [https://er.rtc.ru/images/docs/2023/Sbornik-tezisev\\_ER-2023.pdf](https://er.rtc.ru/images/docs/2023/Sbornik-tezisev_ER-2023.pdf).
- 5 Пряничников В.Е., Ксензенко А.Я., Ястребов В.В. Применение активной лазерной проекции при 3D подводном оптическом сканировании. «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА», Сборник тезисов 34-й Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК – ООО «Типография Фурсова», 2023. – 306 с.: ил., с. 37-41, ISBN 978-5-6048032-9-5, [https://er.rtc.ru/images/docs/2023/Sbornik-tezisev\\_ER-2023.pdf](https://er.rtc.ru/images/docs/2023/Sbornik-tezisev_ER-2023.pdf).
- 6 Yastrebov, V[yacheslav]; Pryanichnikov, V[alentin]; Chernyshev, V[adim] & Sharonov, N[ikolay] (2023). Approaches to Implementation of the 3D Laser Scanning to Ensure the Search and Docking of Autonomous Underwater

- Robots with a Walking Base, Proceedings of the 34th DAAAM International Symposium, pp.0035-0039, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-41-9, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/34th.daaam.proceedings.005 (Scopus)
- 7 Gerald G.L. Seet, Viatcheslav V. Iastrebov, Pang W. Ching, Tegoeh Tjahjowidodo. 3D Graphic Laser Safety Notification System for Industrial Human-Robot Cell. ICRMMS 2020: 14. International Conference on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems November 05-06, 2020 in Amsterdam, Netherlands. Conference Code: 20NL11ICRMMS.
- 8 Huy Dinh Quilong Yuan, Iastrebov Viatcheslav, and Gerald Seet. 2017. Augmented reality interface for taping robot. In 2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, 275–280. <https://doi.org/10.1109/ICAR.2017.8023530>
- 9 Gerald Seet, Viatcheslav Iastrebov, Dinh Quang Huy and Pang Wee-Ching (2016). Laser Graphics in Augmented Reality Applications for Real-World Robot Deployment, Recent Advances in Robotic Systems, Dr. Guanghui Wang (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/63635. Available from: <http://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-robotic-systems/laser-graphics-in-augmented-reality-applications-for-real-world-robot-deployment>
- 10 Viatcheslav Iastrebov, Choon Yue Wong, Wee Ching Pang, Gerald Seet. Motion Tracking Drone for Extreme Sports Filming. 1st International Conference in Sport Science and Technology (ICSST). 11-12 Dec 2014, 6 pp.
- 11 Komarov I.V., Smolskiy S., Barton D.K. Fundamentals of Short-Range Fm Radar Published / Engineering, Physics, 30 August 2003. <https://www.semanticscholar.org/paper/Fundamentals-of-Short-Range-Fm-Radar-Komarov-Smolskiy/96377a9051b8ab14171b7f333aaf6eb7a2457ced> (по состоянию на 18.12.2024)
- 12 Morton R.D. and Olson E., Positive and negative obstacle detection using the HLD classifier, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 1579-1584, doi: 10.1109/IROS.2011.6095142. (по состоянию на 18.12.2024).
- 13 Detecting Negative Obstacles by Use of Radar Changes in diffraction and reflection would be used to detect abrupt downslopes. / NASA Tech Briefs // NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, November 2006 <https://yandex.ru/search/?text=Detecting+Negative+Obstacles+by+Use+of+Radar+Changes+in+diffraction+and+reflection+would+be+used+to+detect+abrupt+downslopes.+NASA's+Jet+Propulsion+Laboratory%2C+Pasadena%2C+California&clid=2270455&banerid=6301000000%3A5cedc56778408000268c9b1e&win=387&lr=213> (по состоянию на 18.12.2024).
- 14 Fan, Zeng; Rudlin, Ohn; Asfis, Giorgos; Meng, Hongying (2019). "Convolution of Barker and Golay Codes for Low Voltage Ultrasonic Testing". *Technologies*. 7 (4): 72. doi:10.3390/technologies7040072
- 15 Majid, Alolaibi (2021). Low noise moving target detection in high resolution

- radar using binary code. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2021(1): 8. Bibcode:2021EJASP2021....8A. doi:10.1186/s13634-020-00716-0
- 16 Borwein, P., Mossinghoff, M. (2014). Wieferich pairs and Barker sequences, II. LMS Journal of Computation and Mathematics, 17(1), S. 24-32 DOI: 10.1112/S1461157013000223
- 17 Zhao, Heng; I. Mo, Larry; Gao, Shangkai (2007). Barker-coded ultrasound color flow imaging: Theoretical and practical design considerations. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 54 (2): 319–331. doi:10.1109/tuffc.2007.246. PMID 17328329. S2CID 19527352
- 18 Платонов А.К., Пряничников В.Е. Модель акустической локации рассеивающего рельефа движущимся роботом. – М.: Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР № 58, 1979.
- 19 Пряничников В.Е. Модель интерферирующих эхосигналов, воспринимаемых роботом. – М.: Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР № 89, 1979, 28 с.
- 20 George F. Leydorf, U.S. patent 3,278,937, Antenna near field coupling system. 1966.

## Оглавление

1. Введение .....	3
2. Первоначальная верификация метода обнаружения .....	5
3. Геометрические соображения об условиях обнаружения препятствий .....	6
4. Предлагаемый подход к обнаружению препятствий .....	7
5. Частотная модуляция в радиолокационном измерении расстояния .....	9
6. Фазовое кодирование сигналов .....	10
7. Демонстрационные эксперименты .....	12
8. Эксплуатация, модификация и тестирование .....	16
9. Расчет параболического отражателя .....	17
10. Эксперименты по обнаружению отрицательных и положительных препятствий .....	21
11. Дальнейшая работа .....	23
12. Заключение .....	27
Список литературы .....	29