

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.8>

УДК: 550.837.76, 621.396.6

КОНЦЕПЦИЯ ДВУХЭТАПНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ В АВТОМОБИЛЬНЫХ РАДАРАХ

И.В. Артюхин¹, И.М. Аверин¹, А.Г. Флакман¹,
А.Е. Рубцов¹, Д.Д. Бареев², Е.А. Домбровский²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д.23

² Нижегородский исследовательский центр Huawei
603006, г. Нижний Новгород, ул. М. Горького, д.117

Статья поступила в редакцию 20 мая 2022 г.

Аннотация. В настоящей работе рассмотрена актуальная проблема подавления помех в автомобильных радарах в сложных сигнально-помеховых дорожных ситуациях. Эти ситуации характерны тем, что автомобили могут являться одновременно источниками отраженных сигналов и помех, а также использовать радары одинакового класса (например, радары с линейно-частотно модулированными сигналами, имеющими близкие параметрами). Предложена концепция двухэтапной процедуры подавления помех такого типа. Для первого этапа разработан проекционный метод адаптивного формирования «нулей» в диаграмме направленности антенной решетки в направлении источников помехи. Второй этап основан на проекционном методе «вычитания» помех в частотной области, для исключения частот биений помеховых сигналов из спектра на плоскости «скорость–дальность». Приводятся результаты численного моделирования, показывающие высокую эффективность предложенной концепции подавления помех в ситуации, когда имеется пять автомобилей-целей, один из которых является также источником помехи. При этом параметры полезных сигналов и помех являются одинаковыми (линейно-частотно модулированный сигнал с одинаковой длительностью и полосой).

Ключевые слова: автомобильный радар, система помощи водителю, линейно-частотно модулированный сигнал, антенная решетка, источники сигналов и помех, проекционная матрица, подавление помех.

Автор для переписки: Артюхин Игорь Владимирович, artjukhin@rf.unn.ru

Введение

Системы безопасности и усовершенствованные системы помощи водителю (Advanced Driver-Assistance Systems – ADAS) являются основными направлениями развития интеллектуальных транспортных систем в современном мире. Радары и продвинутые системы безопасности на их основе – ключевые технологии для снижения числа аварий на дорогах, объединяющие адаптивный круиз-контроль, функциональность «Stop and Go», обнаружение в пределах «мертвых зон» и др.

Автомобильный радар миллиметрового диапазона волн представляет собой датчик для обнаружения объектов (других автомобилей, пешеходов, различного рода препятствий) вокруг автомобиля. Радарный датчик является важным конструктивным элементом современных систем активной безопасности автомобилей. На основании сигналов радара производится оценка потенциальной опасности объектов, предупреждение (оповещение) водителя об опасности и в экстренном случае автоматическое воздействие на органы управления автомобиля (тормозную систему, рулевое управление и т.д.). Основным преимуществом радара по сравнению с другими сенсорными системами (лидар, ультразвуковой датчик) является более эффективная работоспособность в плохих погодных условиях (снег, дождь, туман), а также при сильном загрязнении.

Всё больше и больше автомобилей оснащаются радары, что ведёт к усложнению сигнальной обстановки. Вследствие этого возникают взаимные помеховые сигналы, которые могут значительно ухудшать эффективность радаров по определению положения целей и их скоростей. Поэтому, необходима разработка методов подавления помех. Различные международные

исследования, например, европейские проекты EU MOSARIM [1], IMIKO RADAR [2] посвящены анализу данной проблемы.

Подавление помех можно рассматривать как с позиции подавления «на радаре» («on-board» алгоритмы) [1-2], так и с позиции уменьшения влияния помех на основе стратегического планирования частотно-временных ресурсов радаров при помощи системы связи/обмена данными между автомобилями и дорожной инфраструктурой (V2V/I технология) [3-6]. «On-board» алгоритмы могут быть использованы как по отдельности, так и в различных комбинациях. Различные варианты подавления помех рассмотрены ранее и было показано, что стратегия подавления помех должна включать в себя комбинацию пространственных, временных и частотных анти-помеховых методов в единой схеме для достижения наилучших результатов [1, 2, 7-9].

Современные радары используют многоэлементные антенные решетки (АР), как на передатчике, так и на приемнике. АР позволяют повысить точность измерения углового положения объекта, его пространственное разрешение и уменьшить влияние различных типов помех. Одной из особенностей поведения помехи в применении к автомобильным радарам является ситуация, когда цель является источником помехи (имеет собственный радар), т.е. цель и помеха находятся на одном азимуте. В этом случае формирование «нулей» в диаграмме направленности (ДН) АР в направлении помехи ослабит не только помеху, но и полезный сигнал (отраженный от цели), что может привести к неправильному принятию решения системой ADAS.

В настоящей работе предложена концепция для решения данной проблемы, которая основана на применении двух методов – метода формирования ДН АР, учитывающей направления прихода помеховых сигналов, и дополнительного метода подавления помех в частотной области в лучах ДН с помехами. В основе обоих алгоритмов лежит проекционная техника, которая позволяет перейти из общего пространства сигнал–помеха–шум в подпространство сигнал–шум. Предлагаемый подход может быть использован в

качестве метода защиты от помех, когда некоторые цели и помехи находятся на одинаковых азимутальных направлениях.

Исследование эффективности данного подхода проведено для радиолокатора непрерывного излучения с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-радар), как наиболее распространённого в настоящее время. В качестве помеховых сигналов рассматриваются ЛЧМ-сигналы от других радаров.

1. Обработка сигнала в ЛЧМ-радаре

Укрупненная схема автомобильного радара состоит из антенной системы, радиочастотной (высокочастотной) системы, системы обработки сигнала, системы распознавания и системы управления. Антенная система вместе с радиочастотной системой состоит из передающей и приемной антенн, а также из передающего и приемного оборудования. В этой части выполняется модуляция сигнала, перенос на высокие частоты, передача и прием радиосигналов. Антенная система может быть оснащена несколькими передающими и приемными антеннами (АР). Система обработки сигнала обеспечивает измерение расстояния и скорости объектов и их углового положения (азимута). При использовании передающей и приемной АР обеспечивается пространственная обработка сигналов с более точной оценкой углового положения целей, их пространственным разрешением и ослаблением влияния различного рода помех. Упрощенная структурная схема ЛЧМ радара приведена на рис. 1, где ГУН – генератор, управляемый напряжением, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦОС – блок цифровой обработки сигналов, Tx – передающая АР, Rx – приемная АР [10-12].

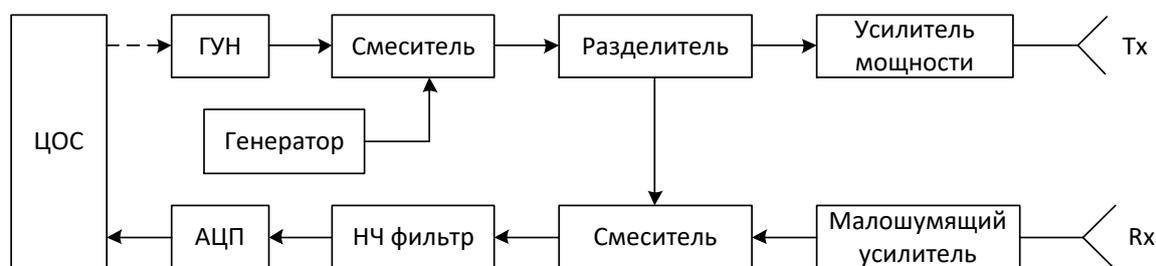


Рис. 1. Упрощенная структурная схема ЛЧМ радара

Мгновенная частота импульса на интервале времени $-0.5T_s \leq t \leq 0.5T_s$ (T_s – длительность импульса) изменяется по линейному закону $f(t)=f_c(t)+\alpha t$ в интервале частот от $f_c-0.5B$ до $f_c+0.5B$, где $\alpha=B/T_s$ – наклон частотной характеристики, f_c – центральная частота, B – ширина полосы. Генерируемый сигнал с точностью до постоянного множителя имеет вид [13, 14]

$$x(t) = \cos[2\pi(f_c t + 0.5\alpha t^2)]. \quad (1)$$

Сформированные ЛЧМ-импульсы передаются на два блока. Разделитель направляет сигнал на усилитель мощности в цепи передающей антенны и на смеситель в цепи приемной антенны. Излученный с передающей антенны сигнал отражается от объектов в секторе излучения и поступает на приемную антенну. В приемном тракте отраженный от цели сигнал усиливается и смешивается с передаваемым сигналом для формирования низкочастотного сигнала биений.

Если цель находится на расстоянии r от радара и движется с радиальной скоростью v , то принятый эхо-сигнал $y(t)$ имеет задержку $\tau=2(r+vt)/c$ (c – скорость света). На выходе смесителя формируется сигнал $x(t)y(t)$ и затем с помощью низкочастотного фильтра выделяется сигнал биений, который можно представить в виде [14]

$$z_b(t) = \cos(\varphi_b(t)), \quad \varphi_b(t) = (2\pi/c)(2f_c r + 2\alpha r t + 2f_c v t). \quad (2)$$

Отсюда следует, что частота биений будет определяться суммой двух компонент $f_b = f_r + f_v$. Одна из которых ($f_r = 2\alpha r/c$) зависит от дальности до цели, а вторая ($f_v = 2v/\lambda$) – от ее радиальной скорости. Если выбрать наклон α достаточно большим, таким что компонента f_v будет пренебрежимо малой ($f_r \gg f_v$), то дальность можно измерить с помощью одного импульса. Такой

радиолокатор принято называть радиолокатором с «короткими» импульсами, имеющими достаточно большой наклон частотной характеристики [14]. Для измерения скорости используется последовательность N_s импульсов.

Дальность цели для l -го импульса равна $r_l = r_0 + vT_1 l$, где r_0 – начальная дальность, T_1 – период повторения импульсов. Учтем, что для современных параметров ЛЧМ-радаров и скоростей движения целей изменение дальности за время всей последовательности импульсов меньше дальности r_0 ($vT_1 N_s \ll r_0$). Тогда, сигнал биений для l -го импульса равен [14]

$$z_{b,l}(t) = \cos\left(\left(2\pi/c\right)\left(2f_c r_0 + 2f_c v T_1 l + 2\alpha r_0 t\right)\right). \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда имеется помеха, которая аналогично полезному сигналу представляет собой ЛЧМ-импульсы с другой центральной частотой f_1 и другим наклоном β частотной характеристики. Такая ситуация является наиболее сложной для ослабления влияния помехи. На выходе низкочастотного фильтра будет выделяться помеха, которую можно представить в виде

$$z_{\text{int}}(t) = \cos\left(2\pi(f_0 - f_1)t + \pi(\alpha - \beta)t^2 + \varphi_0\right). \quad (4)$$

Классический подход к разделению нескольких целей и оценке их дальностей заключается в преобразовании измеренных сигналов в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Каждой отдельной цели соответствует частота биений, из которой можно найти дальность. Затем можно оценить сдвиг фазы за период повторения ЛЧМ-импульсов и, следовательно, радиальную скорость. Для этого выполняется второе БПФ. Таким образом, первое БПФ выполняется по выборкам отдельно для каждого импульса (по «быстрому» времени) и дает частоту биений. Выход первого БПФ используется в качестве входа для второго БПФ, которое выполняется по «медленному» времени и дает доплеровскую частоту. В результате получается двумерный спектр в плоскости «скорость–дальность».

Отклик полезного сигнала от одиночной цели представляет собой дельта-функцию на плоскости «скорость–дальность». В свою очередь, отклик помехи является дельта-функцией, когда параметры помехового радара совпадают с

параметрами сигнала. Если помеха имеет другую длительность, центральную частоту или полосу частот, то отклик помехи на этой плоскости будет иметь вид некоторого ЛЧМ-сигнала.

В результате двух преобразований Фурье находится максимальный сигнал в плоскости «скорость–дальность». Для обнаружения цели значение этого сигнала сравнивается с порогом, выбранным исходя из заданной вероятности ложной тревоги по критерию Неймана–Пирсона. Наиболее часто используется адаптивный двумерный детектор с порядковой статистикой постоянного уровня ложных тревог (Ordered Statistics Constant False Alarm Rate – OS-CFAR) [13, 15, 16].

2. Методы подавления помех

В основе предложенного подхода к подавлению помех лежит комбинация адаптивного проекционного метода формирования ДН АР и дополнительного метода вычитания в частотной области. Ниже приведено описание этих методов по отдельности.

2.1. Адаптивный проекционный метод формирования ДН АР

Будем считать, что нам известны азимутальные направления целей и имеется набор лучей (ДН) приемной антенны с максимумами в этих направлениях. Направления на источники помехи могут отличаться от направлений на цели. Однако мы рассмотрим наиболее сложный случай, когда некоторое число автомобилей-целей также оборудовано ЛЧМ-радаром и, следовательно, являются одновременно источниками полезного сигнала и помехи (цель-помеха).

На первом этапе формируются нули во всех лучах в направлениях всех помех и производится обработка сигналов в лучах, направленных на полезные сигналы (за исключением лучей, направленных на цели-помехи). На выходе каждого из этих лучей выполняется двумерный БПФ (2D Fast Fourier Transform – 2D-FFT). Затем сигналы объединяются в

некогерентном накопителе и поступают на CFAR-детектор. Второй этап необходим для детектирования целей с направлений, совпадающих с направлениями помех (цели-помехи). Для этого рассматриваются лучи в направлении на цели-помехи и в этих лучах формируются нули в направлениях на цели, свободные от помех. Выходные сигналы этих лучей обрабатываются с помощью алгоритма вычитания в частотной области с использованием соответствующей проекционной матрицы. Финальное число целей подсчитывается путём объединения двух решений на первом и втором этапах.

В общем случае весовые коэффициенты в N -элементной линейной АР, формирующей луч в направлении цели, можно представить в виде:

$$w_p = 1/\sqrt{N} \cdot \exp(2\pi j d_\lambda (p-1) \sin(\varphi_0)), \quad (5)$$

где d_λ – расстояние между элементами АР, выраженное в длинах волн λ , φ_0 – направление прихода полезного сигнала относительно нормали к АР. Вектор (5) даёт максимально возможное отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе АР.

Будем считать, что число K источников помехи меньше числа приемных элементов N ($K < N$). Для весовых коэффициентов, формирующих луч в направлении m -го источника, справедливо выражение (5) с заменой φ_0 на φ_m , где φ_m – направление прихода m -ой помехи.

Сформируем матрицу $\mathbf{S}=(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_K)$, где \mathbf{S}_i – вектор весовых коэффициентов для i -ой помехи. Проекционная матрица на пространство, перпендикулярное пространству помех, имеет размерность $N-K$ и может быть записана в виде [17]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{S}(\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H, \quad (6)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица, индекс H обозначает эрмитово сопряжение.

Для подавления помехи адаптивный формирователь ДН использует весовые коэффициенты в виде $\mathbf{V}=\mathbf{P} \cdot \mathbf{W}$. Вектор \mathbf{V} даёт ОСШ близкое к оптимальному для данной помеховой обстановки.

2.2. Алгоритм вычитания помех в частотной области

Дополнительно к адаптивному формированию ДН АР предлагается использовать алгоритм «вычитания» помех в частотной области в лучах с помехами для исключения частот биения помехового сигнала из спектра на плоскости «скорость–дальность». Этот алгоритм вычитания разбит в свою очередь на две процедуры, первая из которых заключается в идентификации частот биения помеховых сигналов при помощи CFAR-детектора, а вторая – в «вычитании» помеховых частот из спектра.

В зависимости от характера отклика помехи на двумерной плоскости «скорость–дальность», полученного на выходе двумерного преобразования Фурье, можно рассматривать три варианта алгоритма вычитания: (i) – одномерный алгоритм (размерность «дальность»); (ii) – одномерный алгоритм (размерность «скорость»); (iii) – двумерный алгоритм (размерность «скорость–дальность»).

Первый и третий вариант предпочтительны для случаев, когда помеховый сигнал имеет такие же характеристики что и полезный сигнал. Второй вариант можно применять для случая, когда параметры сигнала помехи отличаются от параметров сигнала собственного радара. В этом случае отклик помехи на плоскости «скорость–дальность» представляет собой некоторый ЛЧМ-сигнал и может занимать достаточно большое количество частот, соответствующих разным дальностям. Тогда применение одношагового алгоритма приведёт к вырезанию полезного сигнала, что в свою очередь ведёт к ухудшению метрики «пропуск цели».

Описание предложенных вариантов представлено ниже.

Одномерный алгоритм (размерность «дальность») состоит из двух процедур. Для реализации первой из них (идентификация частот биения помеховых сигналов) необходимо:

- выполнить одномерное БПФ по дальности для отдельного импульса. В результате получим спектр $X_r(f)$;

- найти частоты биений помехи с помощью одномерного CFAR-детектора с заданной вероятностью ложных тревог (ЛТ);
- Частоты, значения БПФ которых лежат выше порогового значения, могут быть представлены набором Фурье векторов $\mathbf{S}_r(l), \mathbf{S}_r(m), \dots, \mathbf{S}_r(s)$ с соответствующими значениями $k = [l, m, \dots, s]$ которые необходимо убрать.

Для реализации второй процедуры (вычитание этих частот из спектра) необходимо:

- объединить Фурье-векторы в матрицу $\mathbf{S}_r = [\mathbf{S}_r(l), \mathbf{S}_r(m), \dots, \mathbf{S}_r(s)]$;
- учитывая ортогональность векторов \mathbf{S}_r , найти проекционную матрицу в виде $\mathbf{P}_r = \mathbf{I} - \mathbf{S}_r \mathbf{S}_r^H$;
- вычесть помеховый сигнал из общего спектра с помощью выражения $\mathbf{Y}_r(f) = \mathbf{P}_r \cdot \mathbf{X}_r(f)$.

Отметим, что представленный алгоритм работает хорошо в случае, когда параметры помехового радара совпадают с параметрами собственного радара (ЛЧМ-сигналы с одинаковой длительностью и полосой) и отклик помехи на плоскости «скорость-дальность» будет локализован в узкой части спектра. Если помеха имеет другие параметры, то отклик помехи на плоскости будет иметь вид некоторого ЛЧМ-сигнала. В этом случае применение подобного алгоритма приведёт к вырезанию не только помехи, но и полезного сигнала.

Одномерный алгоритм (размерность «скорость») также состоит из двух процедур. Для реализации первой из них (идентификация частот биения помеховых сигналов) необходимо:

- выполнить одномерное БПФ по скорости при фиксированной дальности. В результате получим спектр $X_s(f)$;
- найти частоты биений помехи с помощью одномерного CFAR-детектора с заданной вероятностью ЛТ;
- Частоты, значения БПФ которых лежат выше порогового значения, могут быть представлены набором Фурье векторов $\mathbf{S}_r(l), \mathbf{S}_r(m), \dots, \mathbf{S}_r(s)$

с соответствующими значениями $k = [l, m, \dots, s]$ которые необходимо убрать.

Для реализации второй процедуры (вычитание этих частот из спектра) необходимо:

- объединить векторы $\mathbf{S}_r(l)$, $\mathbf{S}_r(m)$, ..., $\mathbf{S}_r(s)$ в матрицу $\mathbf{S}_s = [\mathbf{S}_r(l), \mathbf{S}_r(m), \dots, \mathbf{S}_r(s)]$.
- учитывая ортогональность векторов \mathbf{S}_s , найти проекционную матрицу $\mathbf{P}_s = \mathbf{I} - \mathbf{S}_s \mathbf{S}_s^H$;
- вычесть помеховый сигнал из общего спектра с помощью выражения $\mathbf{Y}_s(f) = \mathbf{P}_s \cdot \mathbf{X}_s(f)$.

Второй вариант алгоритма можно использовать для случая, когда параметры ЛЧМ-сигнала помехового радара отличаются от параметров сигнала собственного радара.

Двумерный алгоритм (размерность «скорость-дальность») является комбинацией одномерных алгоритмов, выполняемых последовательно в двух размерностях («дальность» и «скорость»). Дополнительно между двумя одношаговыми алгоритмами необходимо выполнить обратное преобразование Фурье в размерности «дальность» (для перехода во временную область). Для реализации двумерного алгоритма необходимо:

- для каждого импульса применить одношаговый алгоритм (размерность «дальность») и выполнить обратное Фурье-преобразование. В результате получим сигнал $x_r(t)$;
- для каждой фиксированной дальности применить одношаговый алгоритм (размерность «скорость»).

3. Общая концепция подавления помех

Данная концепция состоит из следующих этапов.

1) Этап 1. Оценка параметров помехового сигнала. Временную структуру передачи зондирующего сигнала можно представить в виде активной части

передачи, состоящей из последовательности ЛЧМ-импульсов (пачки импульсов, называемую фреймом), и «пассивной» части без передачи сигнала между фреймами (см. рис. 3). Типичное время активной части порядка 10-15 мсек, пассивной – порядка 25-30 мсек. Общее время (активная плюс пассивная часть) ~ 40 мсек [12].

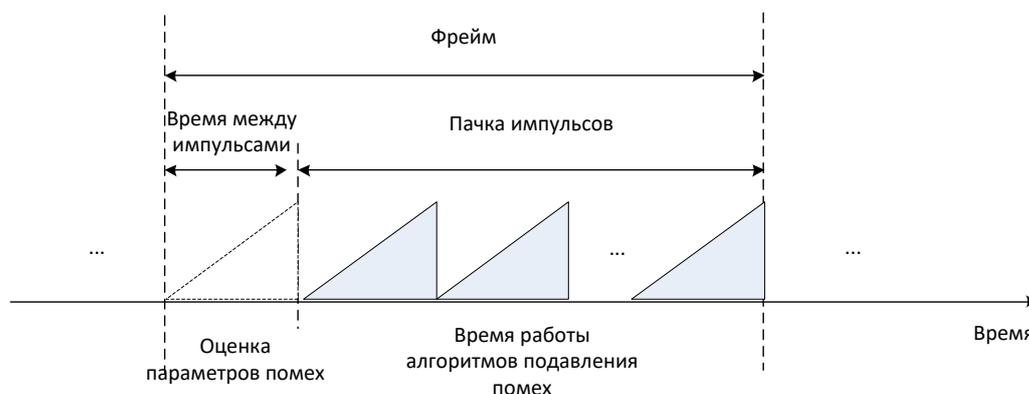


Рис. 3. Конфигурация передачи пакета ЛЧМ-импульсов

Оценка параметров помехи происходит в режиме пассивного приема во время первого импульса, когда собственный радар «слушает» окружающее пространство, не излучая в пространство свой зондирующий сигнал. Такой подход широко используется в случае квазистатического поведения помеховых сигналов. Отметим, что проблемы оценки параметров помехового сигнала не рассматривается в данной статье.

2) Этап 2. Обработка сигналов в лучах без помех. Выполняются операции:

2.1) Находится проекционная матрица \mathbf{P}_1 в соответствии с выражением (6) для формирования нулей в ДН в направлении помех.

2.2) Реализуется 2D-FFT для каждого луча.

2.3) Объединяются выходы блока 2D-FFT в один поток путем некогерентного суммирования (Non-Coherent Integration – NCI).

2.4) Детектируются цели с помощью CFAR-детектора и оцениваются их дальности и скорости.

Блок-диаграмма операций на этапе 2 показана на рис. 4, где L – число лучей без помехи.

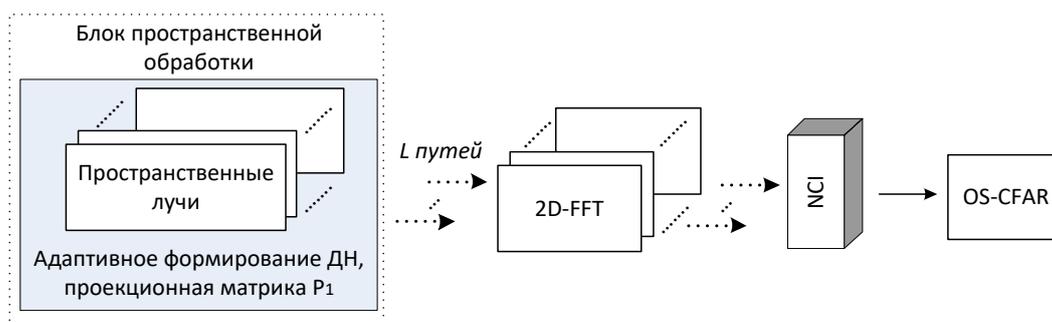


Рис. 4. Блок-схема вычислений на этапе 2

3) Этап 3. Обработка сигналов в лучах с помехами. Выполняются операции:

3.1) Находится проекционная матрица \mathbf{P}_2 для каждого луча в направлении других целей. При этом сигналы всех целей, кроме цели на выбранном азимутальном угле вычитаются.

3.2) Реализуется алгоритм вычитания в частотной области для выбранного луча. Алгоритм вычитания применяется в ограниченной области «скорость – дальность» помехи.

3.3) Выполняется 2D-FFT для каждого луча.

3.4) Объединяются выходы блока 2D-FFT в один поток путем некогерентного суммирования.

3.5) Детектируются цели с помощью CFAR-детектора и оцениваются их дальности и скорости.

Блок-диаграмма операций на Этапе 3 представлена на рис. 5, где M – число лучей с помехами, K – общее число лучей ($K = L + M$).

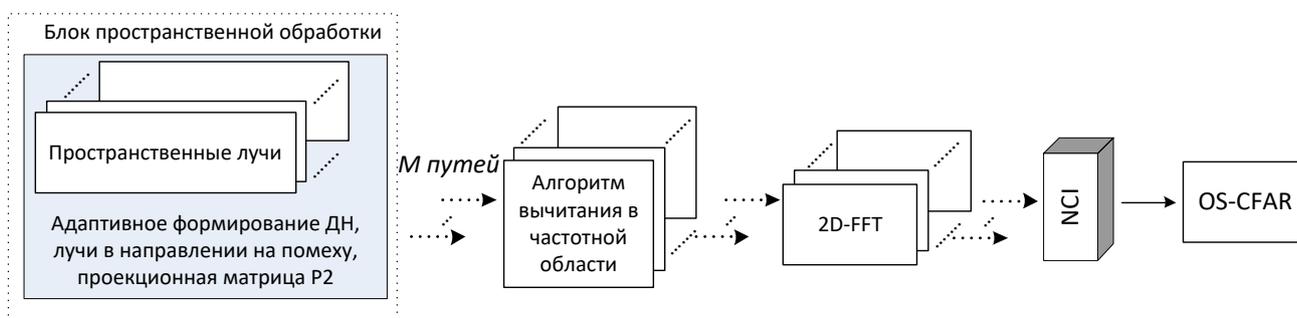


Рис. 5. Блок-схема вычислений на этапе 3

4) Этап 4. Оценка числа целей. Общее число целей определяется путём склеивания двух решений из пунктов 2.4 и 3.5.

4. Результаты численного моделирования

Предложенная стратегия подавления помех была проверена с помощью численного моделирования на основе Монте-Карло в среде Matlab. Анализ полученных результатов был проведен на основе метрики пропуск цели (ПЦ, Miss Detection – MD), равной числу пропущенных целей, и вероятности (P_{fa}) ложной тревоги (ЛТ, False Alarm – FA). Обработка сигналов проведена в соответствии с этапами 1-4 (см. раздел 4). При моделировании предполагалось, что параметры помехового радара совпадают с параметрами собственного радара (ЛЧМ-сигнал с одинаковой длительностью и полосой). В соответствии с выбранными параметрами сигнала и помехи применяется вариант двумерного алгоритма вычитания в плоскости «скорость–дальность».

Основные параметры ЛЧМ-радары представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры ЛЧМ-радары

Параметры	Значения
Диапазон	77 ГГц
Полоса	300 МГц
Длительность импульса	32 мксек
Число импульсов в во фрейме	256
Частота дискретизации АЦП	64 МГц
Размерность БПФ, дальность/скорость	1024 / 256
Адаптивный двумерный OS-CFAR	Вероятность ЛТ: $P_{fa} = 0.01$. Размер окна (скорость × дальность) 5×21
Приемная линейная AP (число элементов / период)	12 / 0.5λ

При моделировании рассматривается сценарий с пятью целями с фиксированными азимутами (-6° , -3° , 0° , 3° , 6°) и одной помехой. Цель №1 с азимутом -6° градусов имеет фиксированные дальность (20 м) и относительную скорость (-20 м/сек). Дальности и скорости других

целей (№2-№5) являются случайными величинами с равномерными распределениями дальности в интервале $[20\div 200]$ метров и скорости в интервале $[-20\div 20]$ м/сек. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) целей считаются одинаковыми и равными 10дБкв.м. Источником помехи является автомобиль с радаром (цель №1). Параметры помехи совпадают с параметрами полезного сигнала: ЛЧМ-сигнал с одинаковой мощностью, полосой, длительностью. Отметим, что данный сценарий является достаточно сложным с точки зрения пространственной обработки. В самом деле, ширина луча приемной АР по уровню половинной мощности составляет 8.6° , то есть угловое расстояние между соседними целями составляет 0.35 от ширины луча.

Обработка сигналов с предложенной схемой подавления помех рассматривается в следующих случаях: (i) помеха отсутствует, (ii) имеется помеха и нет ее подавления, (iii) имеется помеха и есть ее подавление. Без ограничения общности будем считать, что число лучей радара равно числу целей, азимуты целей и источника помехи считаются априори известными.

Пример работы предложенной стратегии подавления помех для единичного фрейма представлен результатами обработки сигналов CFAR-детектора после некогерентного объединения (этап 4) для трех сценариев на плоскости «скорость-дальность» (см. рис. 6-8). Желтым цветом с зеленым контуром обозначены решения CFAR-детектора о наличии цели, черный круг – истинное нахождение целей; красный квадрат – правильное обнаружение целей. Как видно из представленных результатов, наличие помехи без ее подавления приводит к пропуску одной цели (метрика ПЦ=1) и ухудшению процента ложных обнаружений с 0.0119 (помеха отсутствует) до 0.0156. При этом предложенный алгоритм улучшает как метрику ПЦ (с 1-ой пропущенной цели до нуля), так и вероятность ложной тревоги (с 0.0156 до 0.0098).

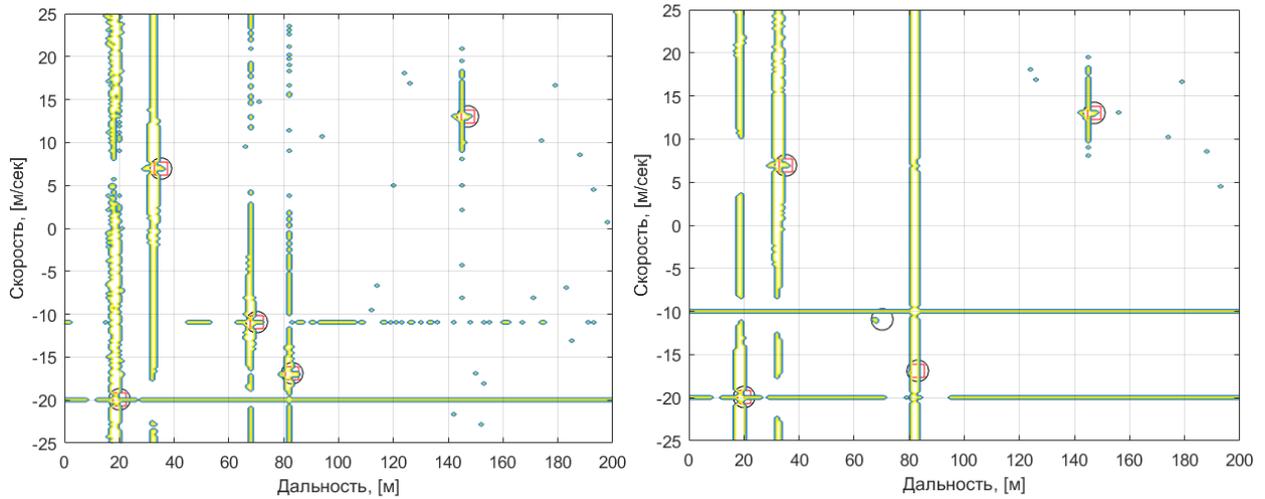
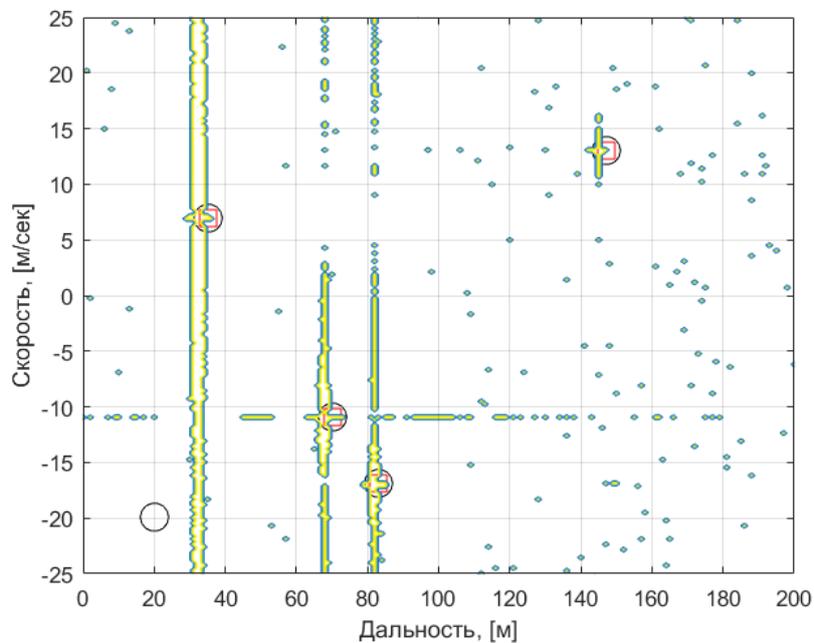
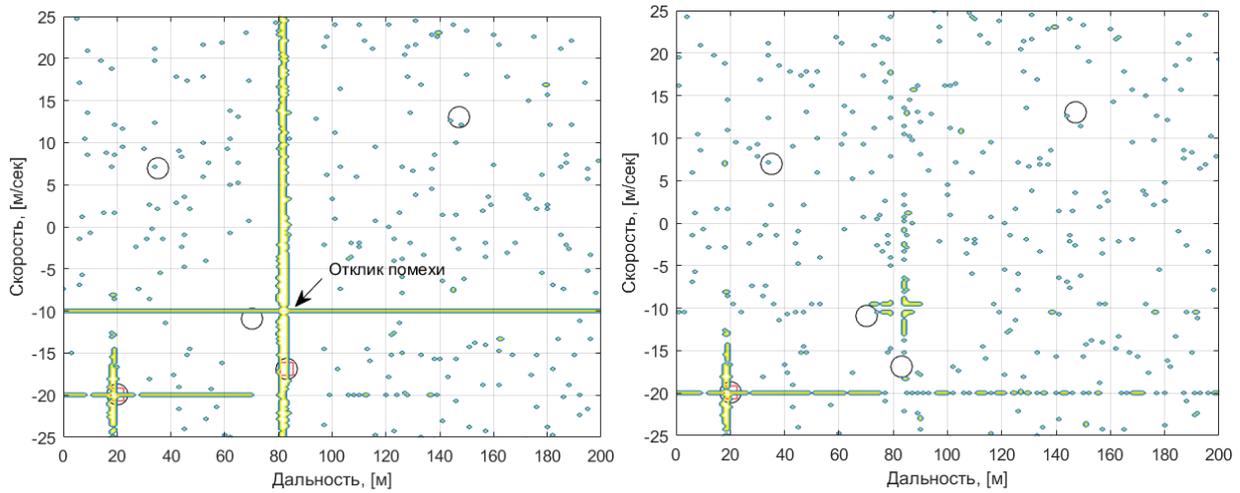


Рис. 6. Выход CFAR-детектора. Слева – сценарий без помехи. ПЦ = 0, $P_{fa} = 0.0119$. Справа – сценарий с помехой, без алгоритма подавления, ПЦ = 1, $P_{fa} = 0.0156$

На рис. 7(а) показан результат обработки сигналов в лучах без помех (этап 2 стратегии). Цель с азимутом -6° не обнаруживается (черный круг на дальности 20 м и скорости -20 м/сек), т.к. в этом луче присутствует помеха. Рис. 7(б) и 7(в) иллюстрируют результаты обработки лучей с помехой на этапе 3. Рис. 7(б) – до вычитания помехи, рис. 7(в) – после вычитания помехи.



а) Этап 2: обработка лучей без помехи



б) Этап 3: обработка лучей с помехой (до вычитания помехи) в) Этап 3: обработка лучей с помехой (после вычитания помехи)

Рис. 7. Выход CFAR-детектора (результаты обработки для этапов 2 и 3)

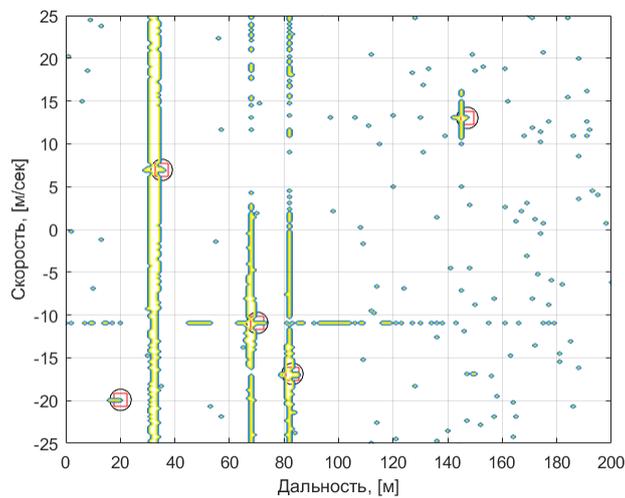


Рис. 8. Выход CFAR-детектора, объединение всех лучей (после подавления помехи), ПЦ = 0, $P_{fa} = 0.0098$

Основные метрики ПЦ и ЛТ (их гистограммы) для рассматриваемых сценариев представлены на рис. 9. Синяя колонна соответствует сценарию без помех, зеленая – наличию помехи без схемы подавления, жёлтая – наличию помехи и схемы подавления. Появление помехи ведёт к сдвигу вправо (в область больших значений) гистограмм ПЦ и ЛТ. В то же время, предложенная стратегия подавления помех улучшает эти метрики.

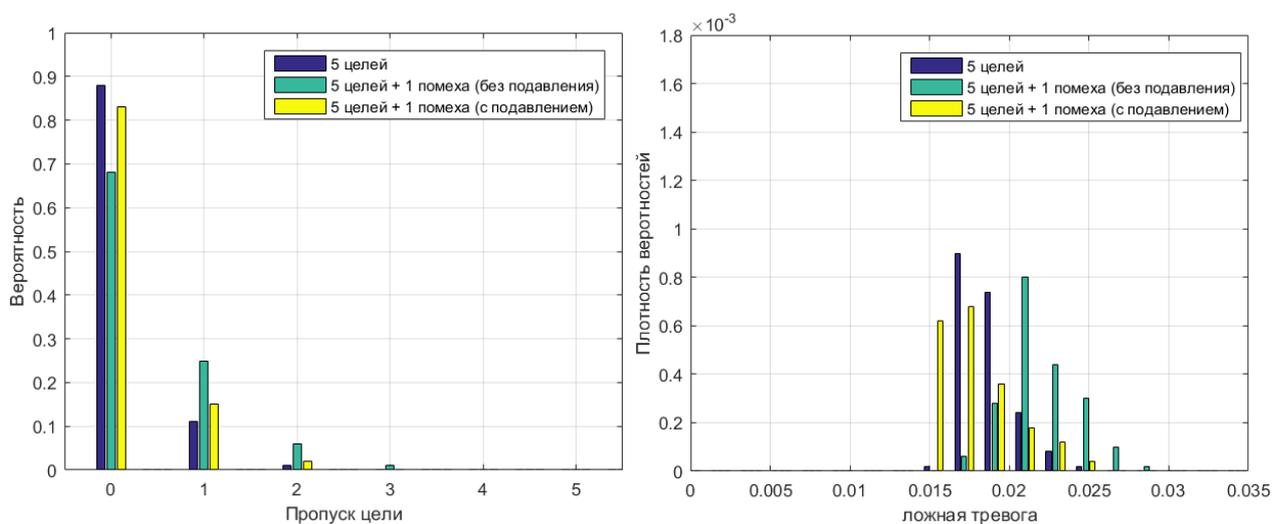


Рис. 9. Гистограммы ПЦ (слева) и ЛТ (слева)

Эффективность предложенной концепции можно представить с помощью сравнения метрик ПЦ (MD) для разных сценариев.

Введем разности $\Delta_{MD} = MD_0 - MD_1$ и $\Delta_{MD} = MD_1 - MD_2$ между различными сценариями обработки сигналов, где MD_0 (сценарий сигнал-без помехи), MD_1 (сценарий сигнал-плюс-помеха без схемы подавления) и MD_2 (сценарий сигнал-плюс-помеха со схемой подавления). Положительные значения Δ_{MD} будут соответствовать выигрышу, а отрицательные значения – проигрышу при сравнении вариантов обработки сигналов. Исследуемая характеристика Δ_{MD} , полученная путем численного моделирования представлена на рис. 10.

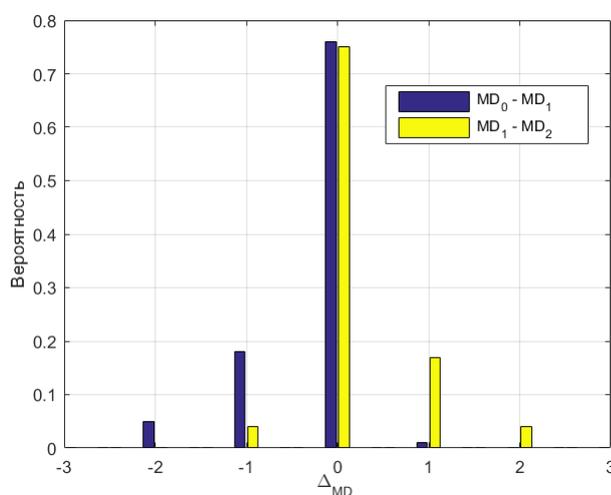


Рис. 10. Эффективность предложенной концепции, Δ_{MD}

Видно, что наличие даже одной помехи без ее подавления ведёт к существенной деградации характеристик обнаружения системы. Сравнение

соответствующих сценариев показывают, что в 23% экспериментов ПЦ ухудшается (см. синие колонны на рис. 10). В то же время, предложенная схема подавления улучшает статистику ПЦ в 21% экспериментов, ухудшение статистики ПЦ наблюдается только в 4% и статистика ПЦ не меняется для 75% экспериментов (жёлтая колонна на рис. 10).

Заключение

В настоящей работе предложена концепция двухэтапного алгоритма подавления помех в автомобильных радарх в сложных условиях, когда автомобили являются одновременно источниками как отраженных сигналов, так и помех, в предположении, что используются радары одинакового класса (радары с линейно-частотно модулированными сигналами, имеющими близкие характеристики).

Рассматриваемый метод является комбинацией двух алгоритмов: адаптивного алгоритма формирования диаграммы направленности антенной решетки, учитывающей направления прихода помеховых сигналов, и дополнительного алгоритма подавления помех в частотной области в лучах ДН с помехами.

Приводятся результаты численного моделирования для сценария пять автомобилей-целей, один из которых является также источником помехи и имеет наименьшую дальность. При этом параметры полезных сигналов и помех являются одинаковыми (ЛЧМ-сигналы с одинаковой длительностью и полосой). Показана высокая эффективность предложенной концепции подавления помех.

Предлагаемая схема может быть использована в качестве алгоритма защиты от помех, когда цели и источники помех находятся в одном направлении (с одинаковыми азимутами).

Литература

1. Kunert M. The EU project MOSARIM A general overview of project objectives and conducted work. *Proceedings of the 9th European Radar Conference*. 2012.
2. IMIKO RADAR project, 2018-2021 [web]. KIT. Date of access: 30.09.2020. URL: https://www.ihe.kit.edu/4977_4347.php.
3. Aydogdu C., et al. Radar Interference Mitigation for Automated Driving: Exploring Proactive Strategies. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. V.37. №4. P.72-84. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2969319>
4. Kumari P., Gonz'alez-Prelcic N., Heath R.W.Jr. Investigating the IEEE 802.11ad Standard for Millimeter Wave Automotive Radar. *IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*. 2015.
5. Rohde & Schwarz. Introduction to the vehicle-to-everything communications service V2X feature in 3GPP release 14, White paper [web]. *Microwave Journal*. Date of access: 15.09.2020. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/34592-introduction-to-the-vehicle-to-everything-communications-service-v2x-feature-in-3gpp-release-14>
6. Aydogdu C., Keskin M.F., Garcia N., Wymeersch H., Bliss D. W. Rad-Chat: Spectrum Sharing for Automotive Radar Interference Mitigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. P.1-14. <https://10.1109/TITS.2019.2959881>
7. Kunert M. Final report, European Commission: More safety for all by radar interference mitigation (MOSARIM) [web]. *European Commission*. Date of access: 30.09.2020. URL: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/94234/reporting/en>
8. Artyukhin I.V., Ermolaev V.T., Flaksman A.G., Rubtsov A.E., Shmonin O.A. Development of Effective Anti-Interference Primary Signal Processing for mmWave Automotive Radar. *IEEE 6th International Conference «Engineering and Telecommunication – En&T-2019»*. MIPT. Moscow – Russia. 2019. P.1-5. <https://doi.org/10.1109/EnT47717.2019.9030561>
9. Artyukhin I.V., Averin I.M., Ermolaev V.T., Flaksman A.G., Rubtsov A.E., Dombrovsky E.A., Bareev D.D. Beam-Domain Interference Mitigation System

- Concept in Application to Automotive Radar. *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. 2021. P.1-5.
<https://doi.org/10.1109/EnT50460.2021.9681737>
10. Patole S., Torlak M., Wang D., Murtaza A. Automotive Radars. A review of signal processing techniques. *IEEE Signal Processing Magazine. Signal Processing for Smart Vehicle Technologies: Part 2*. 2017. P.22-35.
<https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>
11. Application Note: mmWave Automotive Radar and Antenna System Development. [web]. *Cadence*. Date of access: 01.01.2022. URL: www.cadence.com/go/awr
12. Ramasubramanian K. mmWave Radar for Automotive and Industrial Applications. *Texas Instruments* Date of access: 01.01.2022. URL: <https://training.ti.com/epd-pro-rap-mmwaveradar-adh-tr-webinar-eu>
13. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, New York. 2014. 894 p.
14. Meinel F. *Signal Processing Architectures for Automotive High-Resolution MIMO Radar Systems*. PhD thesis. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2020. 191 p. URL: https://www.repo.uni-hannover.de/bitstream/handle/123456789/9978/Dissertation_Meinel.pdf?sequence=3
15. Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1983. V.AES-19. №4. P.608-620. <https://doi.org/10.1109/TAES.1983.309350>
16. Nathanson F.E., Reilly J.P., Cohen M.N. *Radar Design Principles*. McGraw-Hill, New York. 1991. 724 p.
17. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. *Методы обработки сигналов в адаптивных антенных решетках и компенсаторах помехи. Учебное пособие*. Нижний Новгород, Нижегородский госуниверситет. 2015. 194 с.

Для цитирования:

Артюхин И.В., Аверин И.М., Флакман А.Г., Рубцов А.Е., Бареев Д.Д., Домбровский Е.А. Двухэтапная концепция подавления помех в автомобильных радарх. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.8>