

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.11>

УДК: 621.396

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ФМ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВИНЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАБОТКОЙ

О.А. Морозов, Н.А. Пинегина

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2023 г.

**Аннотация.** В работе предлагается алгоритм, реализующий обнаружение фазоманипулированных сигналов с различными несущими частотами на основе винеровской фильтрации с предварительной нелинейной цифровой обработкой. Целью предварительной обработки является выделение фазовых разрывов исходных сигналов. Данный метод позволяет избежать компенсацию неизвестного сдвига частоты, возникающего в следствие эффекта Доплера в задачах определения взаимных временных задержек, существенно сокращая время обработки принятых сигналов по сравнению с традиционными подходами.

**Ключевые слова:** обнаружение сигналов, взаимная временная задержка, метод минимальной дисперсии Кейпона, винеровская фильтрация.

**Автор для переписки:** Пинегина Наталья Андреевна, [natasha\\_pinegina@mail.ru](mailto:natasha_pinegina@mail.ru)

### Введение

Определение координат источника радиоизлучения в реальном масштабе времени является одной из наиболее актуальных задач в области (радио) локации, навигации и связи. На современном этапе развития радиотехнических систем для решения данной задачи разработано достаточно большое количество подходов, основанных на цифровой обработке сигналов (ЦОС). В частности,

областями ее применения являются: обработка сигналов в радиолокации, их обнаружение и оценка параметров, сжатие данных в телеметрии, анализ спектра, прием и преобразование сигналов и т. д. Одним из основных методов, используемых при ЦОС, является цифровая фильтрация. В случае обработки фазоманипулированных (ФМ) сигналов цифровая фильтрация может быть использована для предварительной обработки входного сигнала с целью выделения скачков фазы, соответствующих информационной составляющей сигнала. В данной работе предлагается алгоритм предварительной нелинейной цифровой обработки сигналов с последующей корреляционной обработкой на основе применения винеровской фильтрации.

Данный метод обработки может быть применен к задаче определения навигационных параметров – взаимных временных задержек сигналов, распространяющихся по нескольким каналам связи с различными шумовыми характеристиками, принимаемых независимыми синхронизированными во времени приемниками [1]. В данной задаче обычно один из сигналов является эталонным, т. е. известным заранее или регистрируемым с хорошим отношением сигнал/шум (ОСШ), другой сигнал является его задержанной искаженной копией. При регистрации и/или обработке сигналов спутниковых систем существенный вклад в искажение сигналов вносит эффект Доплера. В качестве наблюдаемых сигналов могут быть использованы сигналы вида:

$$s_1(t) = x(t) + \xi(t), \quad s_2(t) = x(t - t_0, \Delta f) + \eta(t), \quad (1)$$

где  $x(t - t_0, \Delta f)$  – исследуемый сигнал, представляет собой задержанную во времени и смещенную по частоте копию эталонного ФМ-сигнала  $x(t)$ ,  $\xi(t)$  и  $\eta(t)$  – некоррелированные с сигналом аддитивные шумы,  $t_0$  – искомая временная задержка.

Традиционным методом определения взаимной временной задержки при распространении сигнала в каналах связи с низким ОСШ является метод максимального правдоподобия, который в случае отсутствия частотных искажений сигнала, вызванных значительным влиянием эффекта Доплера,

сводится к построению и анализу взаимной корреляционной функции (ВКФ) эталонного и исследуемого сигналов:

$$R(\tau) = R_{xx}(\tau - t_0) + R_{\xi\eta}(\tau), \quad (2)$$

где  $R_{xx}(\tau)$  представляет собой автокорреляционную функцию сигнала  $x(t)$ ,  $R_{\xi\eta}(\tau)$  – взаимная корреляционная функция шумов. Положение глобального максимума данной ВКФ (при  $\tau = t_0$ ) соответствует искомой временной задержке.

Однако, интенсивное влияние шумов, а также значительное влияние эффекта Доплера приводят к искажению ВКФ и снижению степени выраженности ее глобального максимума. В таком случае, метод максимального правдоподобия реализуется через построение взаимной функции неопределенности (ВФН), позволяющей компенсировать смещение несущей частоты сигналов [2,3]:

$$A(\Delta t, \Delta f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t)s_2(t + \Delta t)\exp(-j2\pi\Delta ft)dt. \quad (3)$$

Построение ВФН является вычислительно трудоемкой задачей и требует больших временных затрат, а часто применения специализированных вычислительных средств и алгоритмов. С целью повышения вычислительной эффективности алгоритмов в подобных задачах может применяться предварительная линейная или нелинейная цифровая фильтрация исходных сигналов [4,5].

В данной работе для решения подобных задач предлагается использовать алгоритм, основанный на предварительной нелинейной обработке фазоманипулированных сигналов. Предложенный подход позволяет избежать необходимости компенсации неизвестного сдвига частоты, что значительно сокращает время вычислений. В основе предлагаемого метода лежат методы минимальной дисперсии Кейпона и винеровской фильтрации [6].

## 1. Алгоритм обнаружения сигналов с фазовой модуляцией на основе винеровской фильтрации с предварительной цифровой обработкой

Предварительная цифровая обработка сигналов, структура которых задается синусоидальной составляющей с фазовой манипуляцией, заключается в получении последовательности, отсчеты которой представляют собой отклонения исследуемого сигнала от гармонического сигнала с частотой  $f_0$  и содержат информацию о манипуляциях.

Подход Кейпона [7] заключается в построении линейного фильтра, дисперсия выходного сигнала которого минимальна при условии единичного коэффициента пропускания на заданной частоте  $f_0$ . Математически данная задача может быть описана следующей системой соотношений:

$$\begin{cases} c^H e(f_0) = 1; \\ c^H R c \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4)$$

Решение данной системы имеет следующий вид [8]:

$$c = \frac{R^{-1} e(f_0)}{e^H(f_0) R^{-1} e(f_0)}, \quad (5)$$

где  $c$  – вектор коэффициентов фильтра, индекс  $H$  – эрмитово сопряжение,  $e(f)$  – вектор комплексных экспонент,  $R$  – автокорреляционная матрица гармонического сигнала с частотой  $f_0$ .

В соответствии с предложенным в [6] алгоритмом, основанным на выражении (5) и представляющим собой нелинейную фильтрацию, в процессе обработки отсчеты исходных сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  заменяются отсчетами функции  $\sigma(t)$ , неявно зависящей от мгновенной частоты:

$$\sigma(t_i) = (r_p^{(i)})^T R_p^{-1} r_p^{(i)}, \quad (6)$$

где  $r_p^{(i)}$  – автокорреляционная последовательность исследуемого сигнала, вычисляемая по короткой выборке с использованием скользящего окна.

Поведение функции несущей частоты, полученной на основе выражения (6) для исходного сигнала с двоичной фазовой манипуляцией, представлено на рис. 1б.

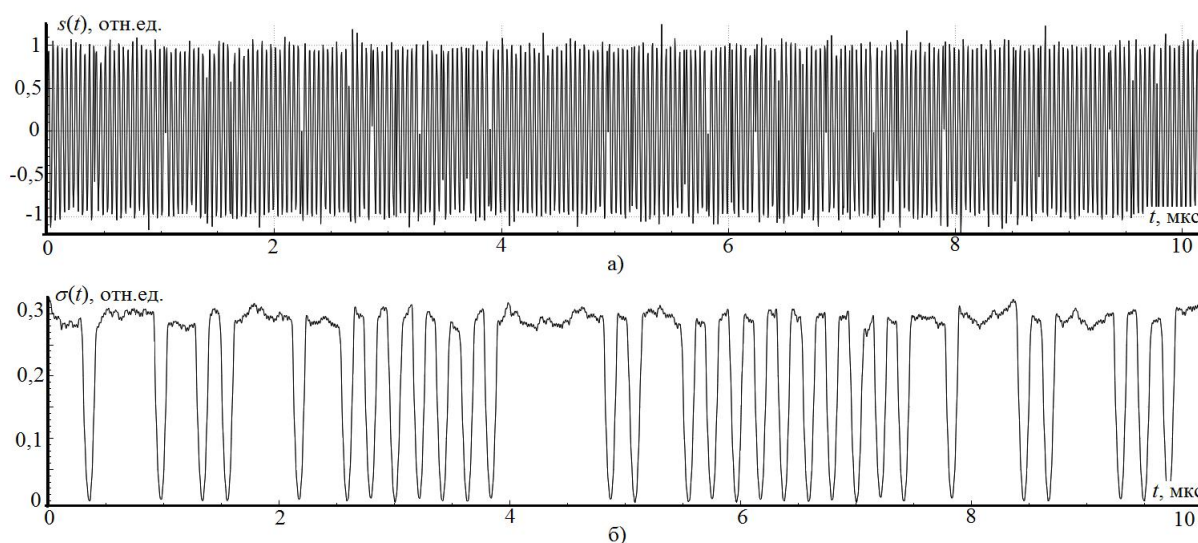


Рис. 1. Входной сигнал (а), выходной сигнал алгоритма предварительной нелинейной фильтрации (б) при ОСШ +20 дБ

Взаимная корреляционная функция данных последовательностей, полученных для сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , будет иметь глобальный максимум в точке  $\tau = t_0$ , соответствующей временной задержке. Характерный вид полученной ВКФ представлен на рис. 3а.

В данной работе для определения взаимной временной задержки последовательностей  $\sigma_{1,2}(t)$  предлагается использовать алгоритм обнаружения на основе винеровской фильтрации. При построении фильтра Винера ставится задача обнаружения некоторого линейного фильтра, воздействие которого на входной сигнал приведет к формированию сигнала с минимальным среднеквадратичным отклонением от эталонного сигнала, т. е. минимизирует величину  $M[S_\alpha(x) - S_T(x)]^2$ , если известны спектральные плотности мощности сигнала  $P_s(\omega)$  и некоррелированного с ним шума  $P_n(\omega)$ , где  $M[\cdot]$  – знак математического ожидания. Уравнение для его определения будет выглядеть следующим образом:

$$S_\alpha(x) - S_T(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{F(\omega)}{H(\omega)} K(\omega, \alpha) - S_T(\omega) \right] e^{j\omega x} dx =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{F_T(\omega) + N(\omega)}{H(\omega)} K(\omega, \alpha) - S_T(\omega) \right] e^{j\omega x} dx, \quad (7)$$

где  $K(\omega, \alpha)$  – стабилизирующий множитель.

После вычисления математического ожидания и минимизации полученного значения (с помощью поиска производной по  $K(\omega, \alpha)$ ), получим условие минимума:

$$K(\omega, \alpha) = \frac{|H(\omega)|^*}{|H(\omega)|^2 + \frac{P_N(\omega)}{P_S(\omega)}}. \quad (8)$$

Для придания большей гибкости винеровской фильтрации был использован видоизмененный стабилизирующий коэффициент:

$$K(\omega, \alpha) = \frac{|H(\omega)|^*}{|H(\omega)|^2 + \alpha \frac{P_N(\omega)}{P_S(\omega)}}. \quad (9)$$

Данному стабилизирующему коэффициенту соответствует обратный оператор вида:

$$R_\alpha = F^{-1}[K(\omega, \alpha) \cdot X(\omega)], \quad (10)$$

где  $F^{-1}$  – оператор обратного преобразования Фурье,  $X(\omega)$  – преобразование Фурье последовательности  $\sigma(t)$  исследуемого сигнала.

Алгоритм обнаружения ФМ–сигналов на основе винеровской фильтрации с предварительной нелинейной обработкой, предложенный в данной работе, может быть представлен следующим образом:

- 1) Входные фазоманипулированные сигналы обрабатываются с помощью алгоритма (6), основанного на методе минимальной дисперсии Кейпона;
- 2) Полученные функции  $\sigma_{1,2}(t)$ , неявно зависящие от мгновенной частоты, подаются на вход винеровского фильтра (в соответствии с выражениями (9, 10));
- 3) По выходу нелинейного фильтра определяется временная задержка между исследуемыми сигналами, как координата пика с максимальной амплитудой.

Функциональная схема алгоритма представлена на рис. 2.

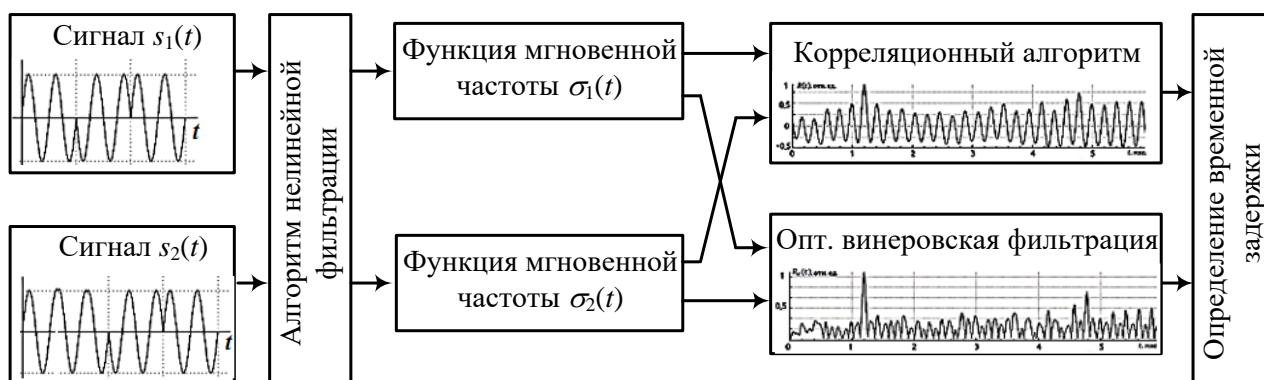


Рис. 2. Функциональная схема предлагаемого алгоритма

Результат обработки  $\sigma_{1,2}(t)$  в соответствии с выражениями (9, 10) представлен на рис. 3б.

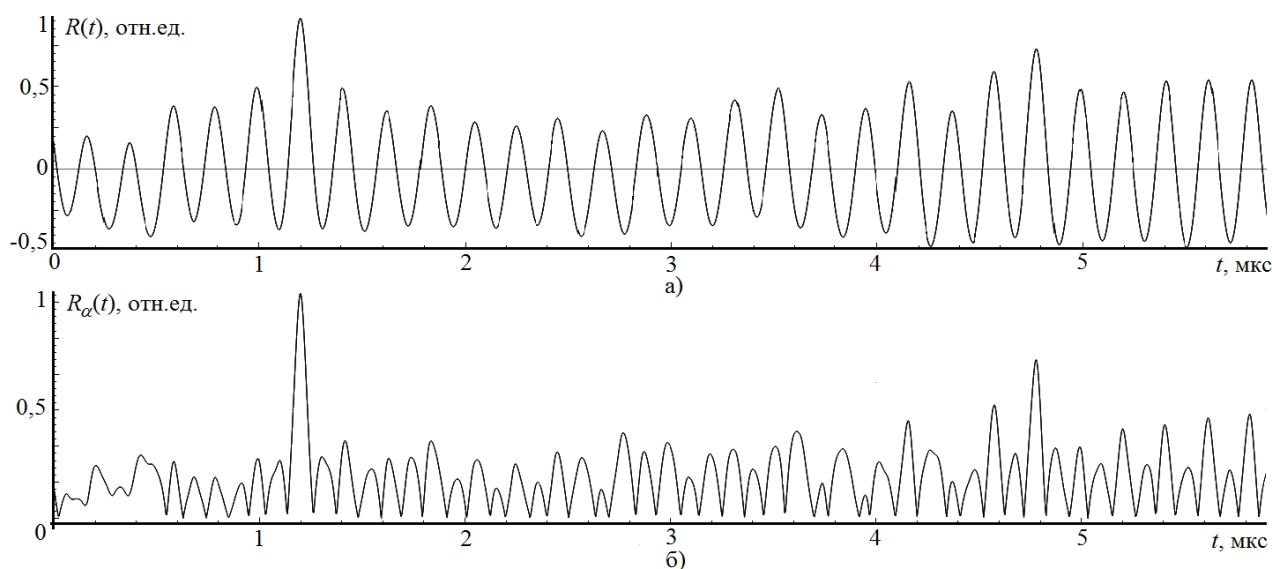


Рис. 3. Характерный вид ВКФ для  $\sigma_{1,2}(t)$  (а), выход оптимального линейного фильтра для  $\sigma_{1,2}(t)$  (б) при ОСШ = 20 дБ

## 2. Исследование эффективности алгоритма определения взаимной временной задержки

Для определения эффективности предложенного алгоритма предварительной цифровой фильтрации в задаче определения ВВЗ сигналов с различными шумовыми характеристиками при наличии значительного эффекта Доплера было проведено исследование зависимости вероятности правильного обнаружения от уровня шума. Результаты исследования получены методом компьютерного моделирования. В качестве исходных сигналов использована модель ФМ-сигналов с двоичной фазовой модуляцией:

$$s(t) = a \sin(\omega \cdot t + \varphi(t)) + \xi(t), t \in (0, T), \varphi = \{0, \pi\}. \quad (11)$$

Модель фазоманипулированного сигнала характеризовалась следующими параметрами (аналогично [6]): длина выборки эталонного сигнала 1000 отсчётов, длина выборки исследуемого сигнала 2500 отсчётов, несущая частота эталонного сигнала 25 кГц, несущая частота исследуемого сигнала 26 кГц, скорость передачи данных в эталонном и исследуемом каналах 4800 бит/с, частота дискретизации 250 кГц, временная задержка сигнала исследуемого канала 500 отсчётов.

Для построения функции текущей частоты (6) использовалось скользящее окно длиной  $L = 30$  (кол-во отсчетов сигнала, по которому вычисляются  $p$  отсчетов автокорреляционной функции), параметр фильтра  $p = 7$ . Стоит отметить, что существенным моментом моделирования являются выбор длины окна  $L$ , по которому происходит вычисление автокорреляционной последовательности, а также способ построения псевдообратной матрицы. В данной работе для ее построения был использован алгоритм, основанный на сингулярном разложении матрицы.

Далее на исследуемый сигнал накладывался аддитивный белый гауссов шум, ОСШ в эталонном канале фиксировалось на уровне 10 дБ. Определение задержки проводилось с помощью корреляционного алгоритма и оптимальной винеровской фильтрации для отношений сигнал/шум от 15 до -15 дБ. Зависимости вероятности правильного определения временной задержки сигналов от уровня аддитивного шума при частоте Доплера [1 кГц, 10 кГц, 20 кГц, 30 кГц] приведены на рис. 4. Линии 1.X соответствуют результатам исследования алгоритма, использующего оптимальную винеровскую фильтрацию, линии 2.X соответствуют корреляционному алгоритму. Каждая точка на графиках является результатом усреднения по 1000 испытаниям. Испытание считалось благоприятным, если временная задержка определилась верно, с точностью до половины длительности информационного бита.



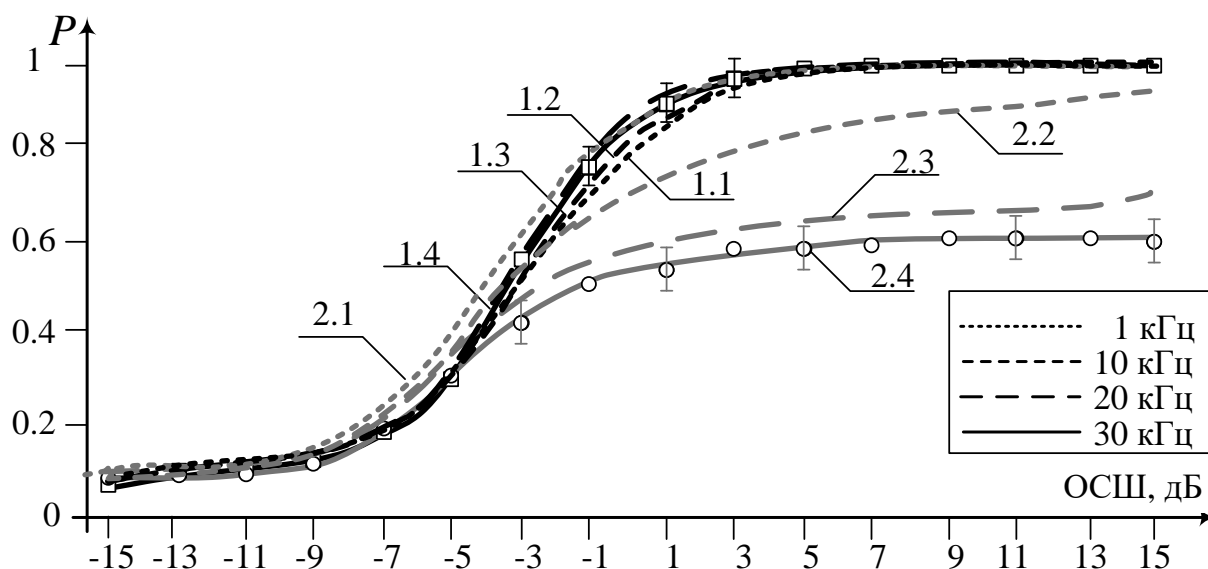


Рис. 4. Зависимости вероятности правильного определения временной задержки сигналов от ОСШ при различной частоте Доплера

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что при небольшом значении частоты Доплера корреляционный алгоритм является более эффективным в области низкого ОСШ. При увеличении доплеровского сдвига частоты эффективность корреляционного алгоритма снижается. Таким образом, в случае значительного влияния эффекта Доплера более устойчивую работу показывает алгоритм, использующий винеровскую фильтрацию.

## Заключение

В работе предложен алгоритм определения взаимной временной задержки сигналов с двоичной фазовой модуляцией на основе винеровской фильтрации с предварительной нелинейной обработкой. Задача определения взаимной временной задержки решена с помощью данного алгоритма в условиях значительного влияния эффекта Доплера, т. е. в случае сдвига спектра одного из обрабатываемых сигналов. Проведено исследование устойчивости алгоритма к изменению отношения сигнал/шум при различных значениях доплеровского смещения частоты в канале связи. Применение предложенного алгоритма позволяет повысить помехоустойчивость определения взаимных временных задержек при обработке сигналов в условиях значительного влияния эффекта Доплера.

## Литература

1. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М., Ипатов П.В. *Радиотехнические системы*. Москва, Высшая школа. 1990. 496 с.
2. Stein S. Algorithms for ambiguity function processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1981. V.29. №3. P.588-599. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1981.1163621>
3. Yatrakis C.L. *Computing the cross ambiguity function – a review*. Binghamton University, State University of New York. 2005. 131 p.
4. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Хмелев С.Л. Комбинированная цифровая фильтрация гармонического заполнения фазоманипулированных в задаче определения временной задержки. *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2007. Т.50. №3. С.255-264.
5. Логинов А.А., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Алгоритм цифровой предварительной обработки сигналов с квадратурной фазовой модуляцией в задаче определения взаимной временной задержки. *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2009. Т.52. №5-6. С.503-510.
6. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Фидельман В.Р. Алгоритм нелинейной цифровой фильтрации гармонического заполнения фазоманипулированных сигналов. *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2006. Т.49. №8. С.704-711.
7. Марпл-мл. С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. Москва: Мир. 1990. 265 с.
8. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Хмелев С.Л. Метод определения временной задержки частотно-манипулированных сигналов на основе модифицированного подхода минимума дисперсии Кейпона. *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2008. Т.51. №7. С.633-640.

**Для цитирования:**

Морозов О.А., Пинегина Н.А. Алгоритм обнаружения ФМ-сигналов на основе винеровской фильтрации с предварительной нелинейной обработкой. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2023. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.11>