

Отчет по лабораторной работе №1

**Исследование рабочих характеристик оптимального
обнаружителя сложных радиолокационных сигналов.**

Выполнили студенты группы 0420ДМР1Г
Виноградов И.Д., Понур К.А., Шиков А.П.

Нижний Новгород, 2020

1. Введение

Целью лабораторной работы является изучение работы оптимального приемника сложного радиолокационного сигнала с помощью математической модели, реализованной в среде графического программирования LabVIEW. В работе были исследованы спектральные и корреляционные характеристики импульса с линейной частотной модуляцией. Также экспериментальным путем были получены рабочие характеристики приемника, оптимизированного для обнаружения на фоне белого Гауссова шума полностью известного сигнала. Затем те же измерения были выполнены для сигнала со случайной фазой и амплитудой (а также со случайной фазой и случайной амплитудой одновременно). В ходе работы была смоделирована работа приемника сложных сигналов, были изучены оптимальные реализации эксперимента, когда приемник настраивался верно (при этом количество правильных обнаружений было гораздо больше количества ложных тревог).

Стоит отметить, что в ходе лабораторной работы нами был освоен пользовательский интерфейс программы в среде графического программирования LabVIEW и как следствие были отточены навыки работы с этой программой. Программа Laba_SRS.vi (RADAR), содержащая эмулированную версию экспериментальной установки, запускалась с помощью персонального компьютера. Соответственно, все вычислительные работы производились с использованием ресурсов персонального компьютера.

В современных радиотехнических системах широко применяется цифровая обработка сигналов. В данной работе будет исследоваться упрощенная модель, описывающая только основные этапы алгоритма оптимальной обработки радиолокационного сигнала, которые следуют за его оцифровкой. Такая обработка может быть реализована как с помощью специализированных сигнальных процессоров, так и с помощью компьютера общего назначения с соответствующим программным обеспечением. Эта модель не включает такие важные этапы обработки, как усиление и предварительную фильтрацию сигнала, его перенос на промежуточную частоту, окончательную фильтрацию, автоматическую регулировку усиления и другие адаптивные процедуры. В ней также не отражены систематические изменения амплитуды сигнала, вызванные, например, прохождением цели через диаграмму направленности антенны. Не учтен в модели и доплеровский сдвиг частоты, возникающий при движении цели. Тем не менее, предлагаемая модель позволяет без использования реальной аппаратуры получить хорошее представление о процессах обработки сигналов в радиолокационных системах, которые происходят после переноса сигнала на промежуточную частоту, фильтрации и оцифровки.

Согласованный фильтр — это линейный оптимальный фильтр, построенный исходя из известных спектральных характеристик полезного сигнала и шума. Согласованные фильтры предназначены для выделения сигналов известной формы на фоне шумов. Под оптимальностью понимается максимальное отношение сигнал/шум на выходе фильтра, и так как фильтр линейный форма сигнала на выходе остается неизменной.

Для радио- и гидролокационных систем момент появления отраженного сигнала, как правило, неизвестен. У отраженного от реальной цели сигнала фаза, а также амплитуда, являются случайными величинами. Теоретический вид оптимального приемника с исполь-

зованием корреляторов приведен на рис. 1.

Такой приемник включает два идентичных коррелятора, на которые в качестве опорных подаются излучаемый сигнал и его квадратура. На выходах корреляторов формируются действительная I и мнимая Q составляющие некоторого аналитического сигнала. На пороговое устройство подается его огибающая. Пороговое устройство фильтрует сигнал в зависимости от амплитуды выходного сигнала.

Упрощенную схему можно реализовать с помощью согласованного фильтра, как это показано на рис. 2.

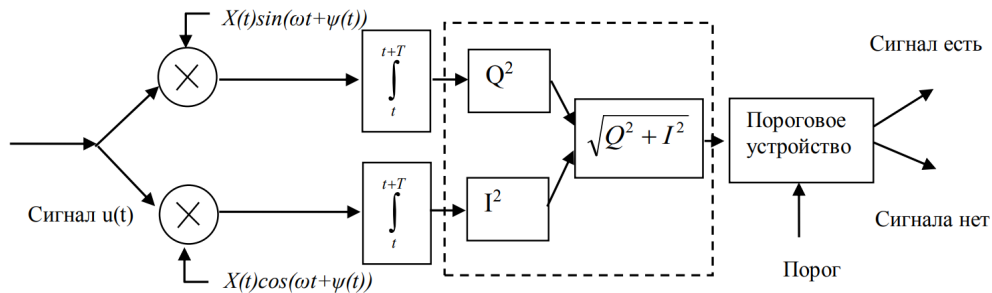


Рис. 1: Блок-схема обнаружителя сигнала со случайной фазой и амплитудой на фоне белого гауссова шума с использованием двух корреляторов (устройство синхронизации на данной схеме отсутствует, т.к. интегрирование ведется в скользящем окне)

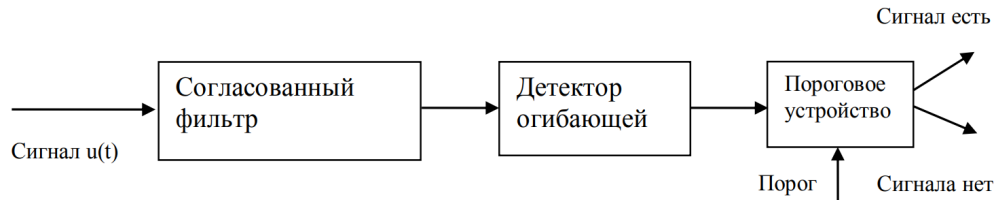


Рис. 2: Блок-схема обнаружителя сигнала со случайной фазой и амплитудой на фоне белого гауссова шума с использованием согласованного фильтра и детектора огибающей

Детектор огибающей осуществляет измерение огибающей входного сигнала, т.е. формирует выходной сигнал вида $u_{\text{вых}}(t) = K_{\text{дет}} A(t)$.

Для выбора порога l_0 в задаче обнаружения в радио- и акустической локации применяется критерий Неймана-Пирсона. Он гласит, что при заданном отношении сигнал/шум порог должен выбираться так, чтобы при фиксированной величине вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$ вероятность $P_{\text{ПО}}$ правильного обнаружения была максимальной. Связь между этими вероятностями называется рабочей характеристикой приемника - **РХП**.

Для обнаружителя детерминированного сигнала на фоне белого гауссова шума РХП получается только в параметрическом виде, где параметром выступает порог обнаружения l_0 :

$$P_{\text{ПО}} = 1 - F\left(\frac{\ln(l_0)}{d} - d/2\right), \quad P_{\text{ЛТ}} = 1 - F\left(\frac{\ln(l_0)}{d} + d/2\right), \quad (1)$$

где $P_{\text{ПО}}$ - вероятность правильного обнаружения, $P_{\text{ЛТ}}$ - вероятность ложной тревоги, $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-y^2/2) dy$ - интеграл Лапласа, $d^2 = 2E/N_0$ - отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности (СПМ) шума.

При неизвестной фазе выражение для РХП имеет вид

$$P_{\text{ПО}} = Q(d, \sqrt{2 \ln(1/P_{\text{ЛТ}})}). \quad (2)$$

Здесь $Q(v, u) = \int_u^\infty x I_0(vx) \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2}\right) dx$ - функция Маркума.

Если случайными являются фаза и амплитуда, выражение для РХП примет следующий вид (при условии что распределение амплитуды имеет вид Рэлеевского):

$$P_{\text{ПО}} = P_{\text{ЛТ}}^{\frac{1}{1+d^2/2}}. \quad (3)$$

Для обнаружителя сигнала со случайной фазой нужно использовать два идентичных коррелятора на которые в качестве опорных подается излучаемый сигнал и его квадратура. На выходах корреляторов формируются действительная I и мнимая Q составляющие некоторого аналитического сигнала.

2. Практическая часть

2.1. Исследование спектра и корреляционной функции ЛЧМ-сигнала

Было проведено сравнение спектра и корреляционной функции ЛЧМ-сигнала для окна с плоской вершиной при различных значениях разности начальной частоты f_s и конечной частоты f_e . Полученные графики приведены на рис. 3-6

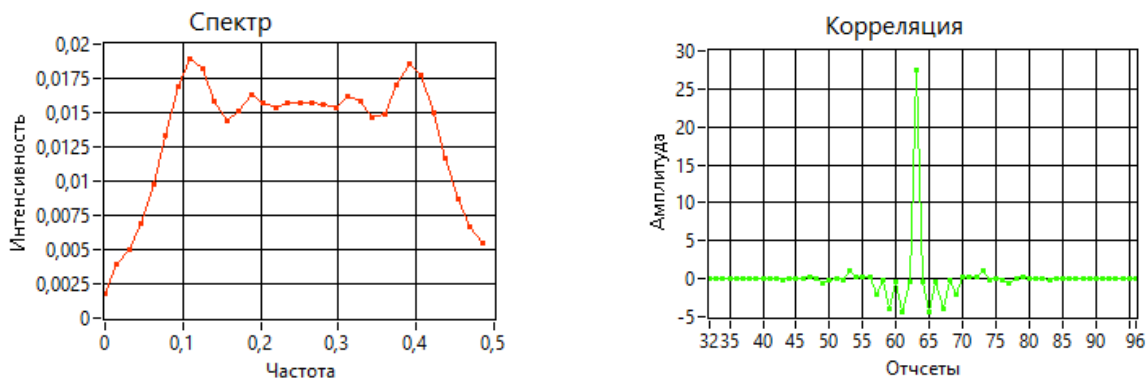
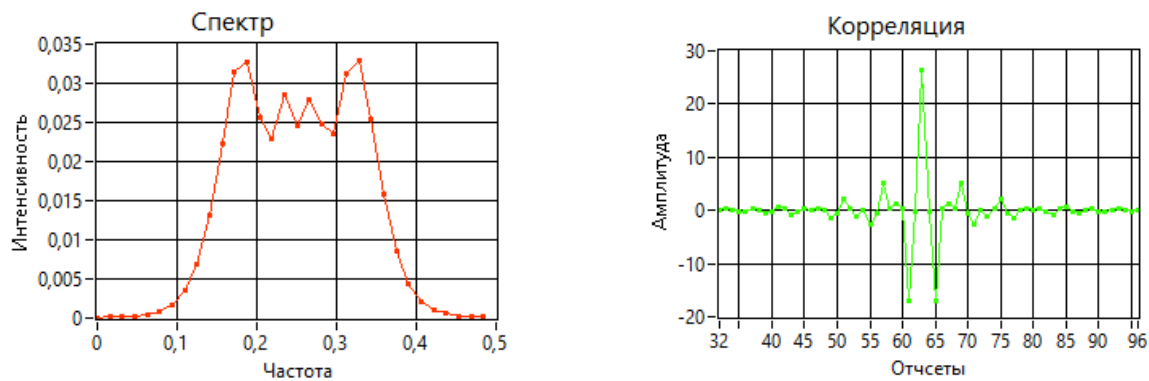
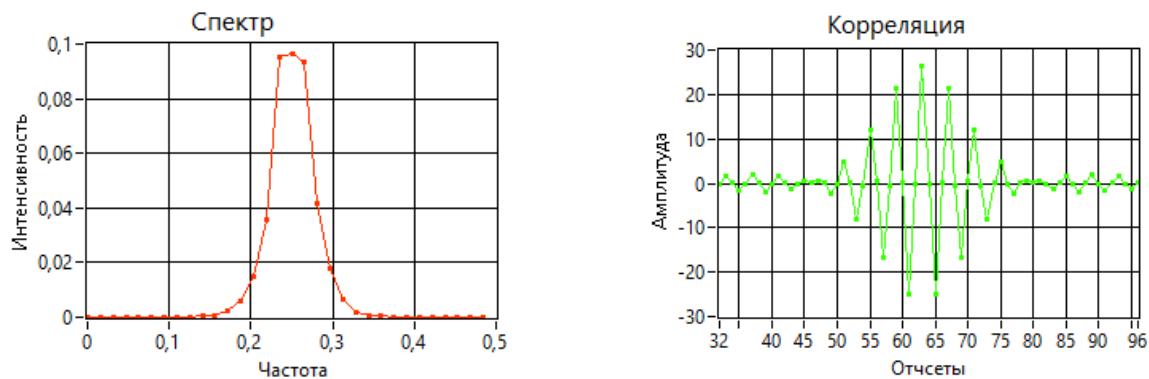
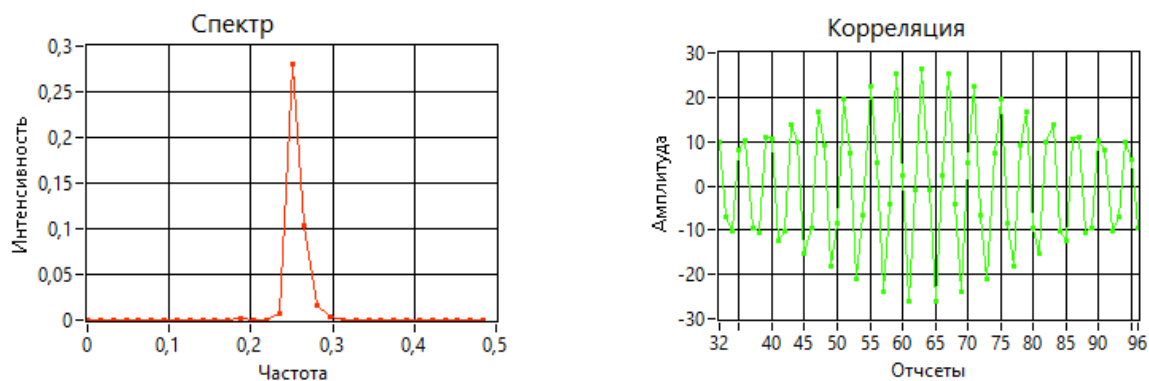


Рис. 3: Разница частот 0.5 ($f_s = 0$, $f_e = 0.5$). Разница фаз = 0

Рис. 4: Разница частот 0.3 ($f_s = 0.1$, $f_e = 0.4$). Разница фаз = 0Рис. 5: Разница частот 0.1 ($f_s = 0.2$, $f_e = 0.3$). Разница фаз = 0Рис. 6: Разница частот 0.01 ($f_s = 0.25$, $f_e = 0.26$). Разница фаз = 0

Из полученных результатов видно, что при уменьшении разницы между начальной и конечной частотой ширина корреляционной функции увеличивается, ширина спектра уменьшается, а значение базы сигнала уменьшается.

Очевидно, что при изменении частотной полосы ЛЧМ-сигнала его спектр пропорционально увеличивается. Исследуемый сигнал является стационарным в широком смысле

случайным процессом, а значит его спектр связан с корреляционной функцией обратным преобразованием Фурье:

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp\{+j\omega\tau\} d\omega \quad (4)$$

А для пары преобразований Фурье мы можем написать соотношение неопределенности в виде:

$$\Delta\tau\Delta\omega \geq 2\pi, \text{ где} \quad (5)$$

$\Delta\omega$ – характерная ширина спектра, $\Delta\tau$ – характерное время корреляции.

Уменьшение ширины спектра объясняется уменьшением количества частотных компонент, использованных в сигнале. Таким образом, при устремлении разницы частот к нулю, вид спектра будет приближаться к δ -функции.

2.2. Исследование РХП

Зависимости вероятности правильного обнаружения $P_{ПО}$ от вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$ для трех значений отношения сигнал/шум были изучены для следующих сигналов: детерминированный, со случайной фазой, со случайной амплитудой, со случайными фазой и амплитудой. Использовались значения СКО шума 0.25, 0.5, 1, 1.5. Результаты приведены на рис. 8.

Как и ожидалось, график РХП для детерминированного сигнала имеет достаточно резкий вид по сравнению с другими сигналами, поскольку отсутствуют случайные компоненты. Сигнал со случайной фазой также имеет достаточно резкую форму графика РХП.

Сигнал со случайной амплитудой и случайной фазой имеет более плавную зависимость, поскольку большая часть ложных тревог и отсутствующего правильного обнаружения зависит именно от амплитуды, которая в данном случае случайна.

Таким образом график РХП сильно зависит от степени неопределенности параметров отраженного сигнала.

Были рассчитаны теоретические зависимости РХП для разных сигналов. Для детерминированного сигнала в качестве теоретических использовались формулы (1), где $SNR = E/N_0$, где SNR - отношение сигнал/шум, полученное экспериментально для каждого сигнала и значения СКО.

В случае сигнала со случайной амплитудой использовалась функция Маркума (2) (при вычислении использовался интеграл от распределения Райса), а для сигнала со случайной амплитудой и фазой использовалась формула (3). Соответствующие теоретические зависимости также приведены на 8.

По приведенным результатам видно, что экспериментальные зависимости по характеру совпадают с теоретическими, однако отличаются абсолютными значениями.

На графиках 8 также отмечены точки для одинакового значения величины порога l_0 : Δ —20, \square —10, \circ —3. Наблюдается общая закономерность - чем больше значение порога, тем меньше вероятность ложной тревоги и меньше вероятность правильного обнаружения.

Сравнивая графики для различных сигналов, можно сделать вывод, что при одинаковых значениях порога вероятность правильного обнаружения уменьшается по сравнению с детерминированным сигналом. Сильнее всего это выражено для сигналов со случайной амплитудой, в то время как для сигнала со случайной фазой зависимость вероятности правильного обнаружения от величины порога близка к зависимости для детерминированного сигнала.

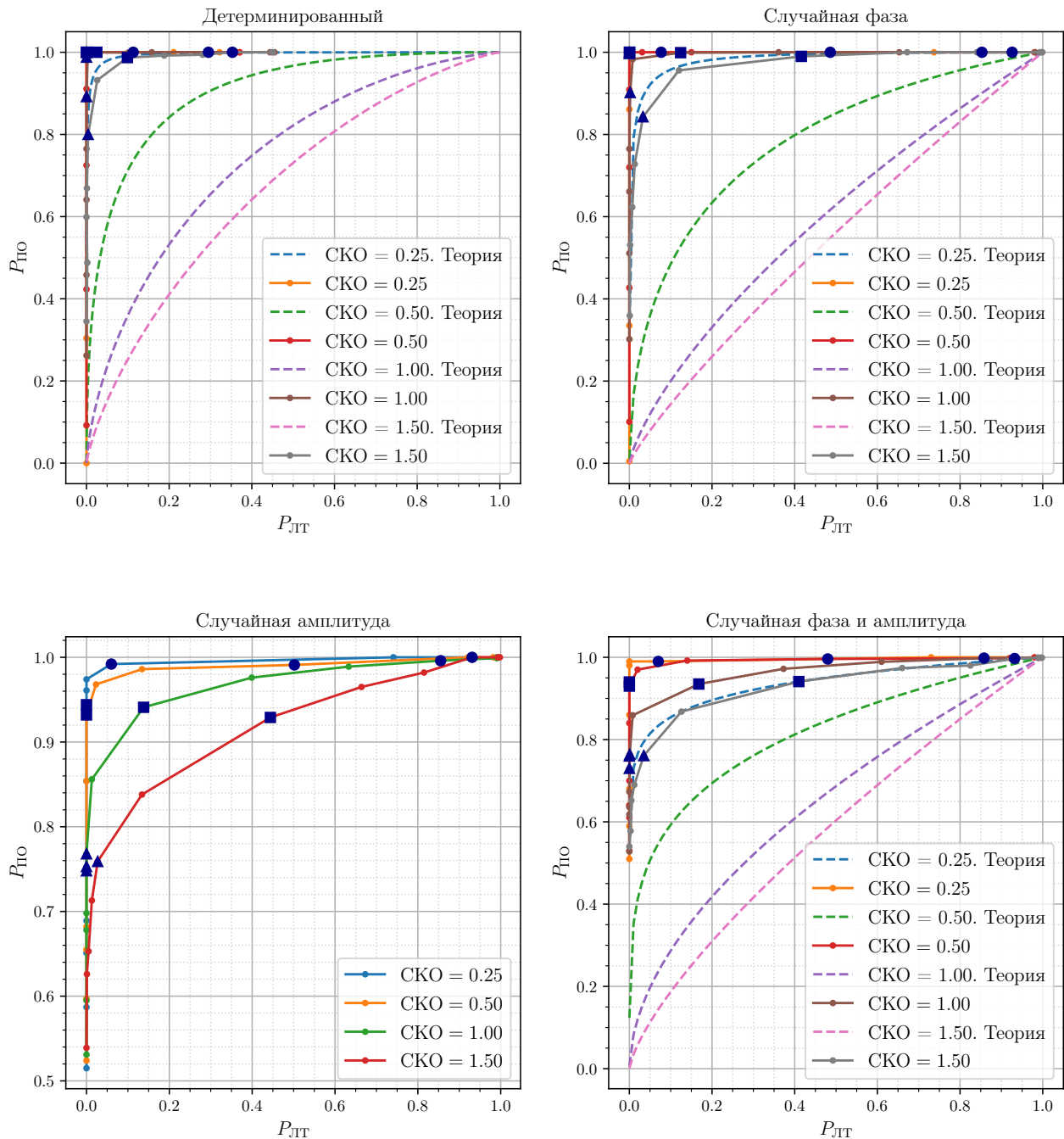


Рис. 8: Графики зависимости РХП для различных сигналов и различных значений СКО. Пунктирными линиями отмечены теоретические зависимости для соответствующего сигнала. На графиках также отмечены одинаковые значения порога: \triangle – 20, \square – 10, \circ – 3.