

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Пахотин В.А., д.ф.-м.н., профессор, Института физико-технических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (БФУ им. И. Канта), e-mail: VPakhotin@kantiana.ru;

Симонов Р.В., аспирант Института физико-технических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (БФУ им. И. Канта);

Власова К.В., к.ф.-м.н., доцент Балтийской государственной академии РФ, e-mail: p_ksenia@mail.ru;

Петров С.В., аспирант Института физико-технических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (БФУ им. И. Канта)

OPTIMAL RECEIVER FOR DETECTING SET OF SIGNALS WITH UNKNOWN PARAMETERS

Pakhotin V.A., Simonov R.V., Vlasova K.V. Petrov S.V.

The problem of detecting a set of signals with unknown parameters is considered. A new structure of an optimal receiver is proposed, the basis of which is the transformed functionality of the likelihood ratio. Together with likelihood equations, it allows minimizing the loss function, both in the orthogonality region and in the non-orthogonality region of the pairs of signals contained in the received implementation.. Unlike the prior art, the optimal receiver in question determines the probability of detecting each of the signals individually contained in the received implementation. The results of model calculations confirming theoretical positions are given. Potential capabilities of detecting a set of signals are analyzed. The possibility of setting the reception probability scale on the indicator radar is shown.

Key words: radar, optimal reception, maximum likelihood method, optimal receiver, signal detection, probability of detection, signal resolution.

Ключевые слова: радиолокация, оптимальный прием, метод максимального правдоподобия, оптимальный приемник, обнаружение сигналов, вероятность обнаружения, разрешение сигналов.

Введение

Решение задачи обнаружения сигнала хорошо известно [1÷9]. Она решается, как правило, на основе двух альтернативных гипотез: в принятой реализации сигнал присутствует, в принятой реализации сигнала нет [1, 2, 4, 7]. Записывая отношение функций правдоподобия и преобразовывая его, можно получить выражение, определяющее оптимальный приемник – обнаружитель сигнала. Он по существу является корреляционным приемником [1, 2]. При известных параметрах сигнала (неизвестен лишь факт нахождения сигнала в принятой реализации) нет необходимости в процедуре минимизации функции потерь (функции риска). В этом случае оптимальный приемник позволяет решить задачу обнаружения, как одного, так и совокупности сигналов. В случае совокупности сигналов, его выходная функция имеет интерференционный характер. Математическое ожидание от выходной функции оптимального приемника будет зависеть от совокупной энергии сигналов, которая меняется в широких пределах в зависимости от разности фаз между сигналами и соотношения их амплитуд. На практике параметры сигналов, как правило, неизвестны. Неизвестно и значение

Рассмотрена проблема обнаружения совокупности сигналов с неизвестными параметрами. Предложена новая структура оптимального приемника, основой которого является преобразованный функционал отношения правдоподобия. Совместно с уравнениями правдоподобия он позволяет проводить минимизацию функции потерь, как в области ортогональности, так и в области неортогональности пар сигналов, содержащихся в принятой реализации. В отличие от известного, рассматриваемый оптимальный приемник определяет вероятность обнаружения каждого из сигналов по отдельности, содержащихся в принятой реализации. Приводятся результаты модельных расчетов, подтверждающих теоретические положения. Анализируются потенциальные возможности обнаружения совокупностей сигналов. Показана возможность установки на индикаторе радиолокатора шкалы вероятности приема.

дисперсии шума в принятой реализации. В этих условиях выход оптимального приемника будет зависеть от неизвестных параметров сигналов, и для получения решения задачи требуется процедура минимизации функции потерь. Потери будут минимальны, если параметры сигнала в принятой реализации будут полностью соответствовать параметрам копии сигнала в оптимальном приемнике. Минимизация функции потерь эквивалентна максимизации выходной функции оптимального приемника по неизвестным параметрам [6, 7, 8]. Неэнергетические параметры позволяют максимизировать выходную функцию. Однако неизвестная амплитуда сигнала при своем изменении монотонно увеличивает выходную функцию, не обеспечивая ее необходимого максимума.

Следовательно, известный [1, 2] оптимальный приемник-обнаружитель не может решить задачу обнаружения сигнала с неизвестной амплитудой. Возникают вопросы, как с пороговым уровнем, так и с оценкой дисперсии шума в принятой реализации.

В настоящей работе предлагается оптимальный приемник с измененной структурой. Он лишен вышеприведенных недостатков, может использоваться при решении задачи обнаружения совокупности неортогональных сигналов. Пороговый уровень определяется по дисперсии шума в принятой реализации, которая оценивается по значению минимума функционала правдоподобия. Основной целью настоящей работы является представление возможностей предлагаемого оптимального приемника.

Основы теории оптимального приема

Запишем функционал отношения функций правдоподобия в следующем виде.

$$\Delta(\vec{\lambda}, \hat{U}_1, \dots, \hat{U}_N, \tau) = \int_{\tau}^{T+\tau} |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_{\tau}^{T+\tau} \left| \hat{y}(t) - \sum_1^N \hat{U}_n \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) \right|^2 dt, \tag{1}$$

где $\vec{\lambda}$ – вектор неэнергетических неизвестных параметров N сигналов; $\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_N$ – комплексные неизвестные амплитуды N – сигналов; $\hat{y}(t)$ – принятая реализация, содержащая N сигналов и аддитивный нормальный шум со средним нулевым значением, дисперсией τ^2 и интервалом корреляции τ_k ; $\hat{f}_n(\vec{\lambda}, t)$ –

функция, определяющая форму n – сигнала; τ – текущее время при скользящем методе обработки на интервале длительности сигнала T .

Первое слагаемое функционала (1) определяет аргумент функции правдоподобия, когда предполагается, что сигналов в реализации нет. Второе слагаемое функционала (1) определяет аргумент функции правдоподобия, когда предполагается, что сигналы присутствуют в

принятой реализации с амплитудами \hat{U}_N .

Преобразуем выражения (1). Исключим в этом выражении зависимость от комплексных амплитуд сигналов. Для этого, дифференцируя (1) по комплексным амплитудам и приравнявая дифференциалы нулю, получим векторное уравнение правдоподобия [3].

$$\vec{\beta} = \hat{R}\hat{U}, \tag{2}$$

где $\vec{\beta}$ – вектор столбец, содержащий элементы

$$\beta_n(\vec{\lambda}, \tau) = \int_{\tau}^{\tau+T} \hat{y}(t) \hat{f}_n^*(\vec{\lambda}, t) dt; \hat{U} – вектор столбец амплитуд, содержащий элементы \hat{U}_N ; \hat{R} – корреляционная функция, элементы которой определены выражением$$

$$\hat{R}_{n,m}(\vec{\lambda}, \tau) = \int_{\tau}^{\tau+T} \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) \hat{f}_m^*(\vec{\lambda}, t) dt.$$

Решая векторное уравнение, получим вектор оценок амплитуд, зависящий от вектора неэнергетических параметров сигналов $\vec{\lambda}$ и времени τ .

$$\hat{U}(\vec{\lambda}, \tau) = \hat{R}^{-1} \vec{\beta}. \tag{3}$$

Подставляя (3) в (1) получим функционал отношения функций правдоподобия, зависящий лишь от вектора неэнергетических параметров сигналов.

$$\Delta(\vec{\lambda}, \tau) = \int_{\tau}^{T+\tau} |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_{\tau}^{T+\tau} \left| \hat{y}(t) - \sum_1^N \hat{U}_n(\vec{\lambda}, \tau) \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) \right|^2 dt. \tag{4}$$

Полученное выражение позволяет, например методом перебора неэнергетических параметров $\vec{\lambda}$, минимизировать функцию потерь на текущем интервале $\tau \div \tau + T$.

Это выражение можно упростить, исключив интеграл от квадрата принятой реализации $\hat{y}(t)$,

$$\Delta(\vec{\lambda}, \tau) = \int_{\tau}^{T+\tau} \hat{y}(t) \left(\sum_1^N \hat{U}_n(\vec{\lambda}, \tau) \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) \right)^* dt + \int_{\tau}^{T+\tau} \hat{y}^*(t) \sum_1^N \hat{U}_n(\vec{\lambda}, \tau) \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) dt - \int_{\tau}^{T+\tau} \left| \sum_1^N \hat{U}_n(\vec{\lambda}, \tau) \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) \right|^2 dt. \tag{5}$$

Полученное выражение (4) (а также (5)) показывает, что процесс минимизации функции потерь необходимо проводить одновременно в двух выражениях (4) и (3) (или (5) и (3)) за счет перебора значений вектора параметров $\vec{\lambda}$. Математическое ожидание от (4), в случае отсутствия сигналов в принятой реализации, равно нулю. Математическое ожидание от $\vec{\beta}$ (выражение (3)) равно нулю, следовательно, и амплитуды сигналов во втором слагаемом стремятся к нулю. Математическое ожидание от (4) в случае наличия N сигналов в принятой реализации и выполнении условия $\vec{\lambda} = \vec{\lambda}$ (условие экстремума) равно энергии совокупности N сигналов $E_{сов}$.

$$M \left(\Delta(\vec{\lambda}, \tau) \right) = \int_{\tau}^{T+\tau} \left| \sum_1^N \hat{U}_n(\vec{\lambda}, \tau) \hat{f}_n(\vec{\lambda}, t) \right|^2 dt = E_{сов}. \tag{6}$$

В этом случае математическое ожидание от (3) определяет вектор истинных (не штрихованных) комплексных амплитуд, содержащихся в принятой реализации. Это означает несмещенность решения. Определим выражение (4) (эквивалент (5)) в качестве выходной функции оптимального приемника-обнаружителя сигналов

$$q(\vec{\lambda}, \tau) = \Delta(\vec{\lambda}, \tau).$$

Структура приемника определяется выражениями (4) и (3) или (5) и (3).

В литературе, например [9], в постановке задачи обнаружения совокупности сигналов используют сложные

гипотезы. Рассматриваются случаи, когда в принятой реализации содержится один, два, три и т.д. сигналов. Согласно выражениям (4) и (3) этого делать не следует, поскольку при проведении процедуры минимизации функции потерь автоматически определяются амплитуды сигналов. Часть значений амплитуд может быть на уровне шумовых максимумов. Они не превышают пороговый уровень и исключаются из рассмотрения. Из этого следует и второе: нет необходимости в знании количества сигналов, содержащихся в реализации. Достаточным условием является следующее. Количество сигналов в копии N должно быть больше действительного количества сигналов в принятой реализации. Амплитуды «лишних» сигналов будут после операции минимизации функции потерь на уровне шумовых максимумов и исключаются за счет порогового уровня.

Математическое ожидание от выходной функции (4) на интервале, где нет сигналов, равно нулю. Математическое ожидание от выходной функции на интервале, где сигналы присутствуют, равно энергии этого сигнала, а при наличии совокупности неортогональных сигналов, равно совокупной энергии. Дисперсия шума в принятой реализации оценивается нормированным функционалом правдоподобия.

$$\Delta = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{T+\tau} \left| \hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n(\hat{\lambda}) \hat{f}_n(\hat{\lambda}, t) \right|^2 dt. \quad (7)$$

Математическое ожидание от (7) в точке $\hat{\lambda} = \bar{\lambda}$ определяет дисперсию шума на входе оптимального приемника $M(\Delta) = \sigma^2$. Оценка дисперсии шума в принятой реализации по выражению (7) и оценка совокупной энергии позволяют определить пороговый уровень и решить задачу обнаружения совокупности сигналов. Однако это решение будет иметь интерференционный характер. При взаимном усилении сигналов вероятность обнаружения может быть высокой. Однако при взаимном подавлении сигналов вероятность обнаружения будет низкой. Покажем, что на основании выражения (3) можно получить более устойчивое решение. В точке максимума функционала (4) выражение (3) определяет оценки амплитуд совокупности сигналов, содержащихся в принятой реализации. Дисперсия амплитуд сигналов находится на уровне дисперсии Рао-Крамера $D_{U_n} = \sigma^2 / N1$ ($N1$ – количество некоррелированных отсчетов на интервале обработки). Это позволяет решить задачу обнаружения для каждого сигнала по отдельности.

Таким образом, выражения (4) и (3) позволяют проводить операцию минимизации функции потерь при решении задачи обнаружения сигналов с неизвестными параметрами. Выражения (4), (3), совместно с (7), полностью решают задачу обнаружения совокупности сигналов с неизвестными параметрами. Используя (3) в точке максимума функционала (4), можно решить задачу обнаружения сигналов в принятой реализации по отдельности для каждого сигнала. Эти решения оказываются более устойчивыми.

Результаты модельных расчетов

Приведем результаты модельных расчетов. При мо-

делировании принято следующее. Принятая реализация содержит, в начале, один радиоимпульс с параметрами: амплитуда $U_1 = 1$, начальная фаза $\varphi_1 = 60$ градусов, время приема $t_1 = 15$ мс, длительность радиоимпульса $T = 3$ мс, интервал дискретизации $\Delta t = 3$ мкс. В этом случае можно показать особенности максимизации выходной функции оптимального приемника (минимизации функции потерь). На рис. 1 показаны две зависимости от времени

$$f1 = \int_{\tau}^{T+\tau} |\hat{y}(t)|^2 dt \text{ и } f2 = \int_{\tau}^{T+\tau} \left| \hat{y}(t) - \hat{U}_1 \hat{f}_1(\hat{\lambda}, t) \right|^2 dt$$

выходной функции оптимального приемника (4). Значение максимума первой функции определяет псевдоэнергию сигнала и шума ($\approx 1,6$). Для получения энергии в джоулях необходимо умножение указанной величины на интервал дискретизации Δt .

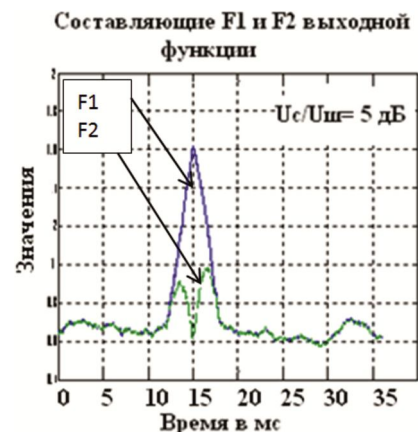


Рис. 1. Зависимость от времени составляющих F_1 и F_2 выходной функции оптимального приемника при отношении сигнал/шум 5 дБ

Вторая функция отображает процесс минимизации функции потерь. В области, где нет сигнала, обе функции тождественны. В переходной области, когда интервал обработки лишь частично совпадает с сигналом, отмечается возрастание как первой, так и второй функции. Вторая функция имеет глубокий минимум в точке минимума функции потерь, когда параметры сигнала и оцениваемые параметры практически совпадают. Кроме того, значение минимума второй функции ($\approx 0,6$) определяет псевдоэнергию шума. Следовательно, разность этих функций максимальна в указанной точке и равна псевдоэнергии сигнала. Таким образом, модельные расчеты подтверждают, что выходная функция оптимального приемника (4) в максимуме определяет энергию сигнала. Зависимость выходной функции от времени приема показана на рис.2 при отношении сигнал/шум на входе приемника 5 дБ. При уменьшении отношения сигнал/шум до значения – 10 дБ шумовая составляющая увеличивается, и лишь на небольшом интервале времени проявляется различие между двумя функциями (рис. 3).

Обнаружение сигнала на основе первой и второй функций оказывается невозможным. Однако выходная функция оптимального приемника при указанном значении отношении сигнал/шум позволяет решить задачу обнаружения сигнала (рис. 4).

Это подтверждает утверждение о том, что функцио-

нал отношения функций правдоподобия позволяет получить более эффективное решение, чем решение на основе функции правдоподобия.

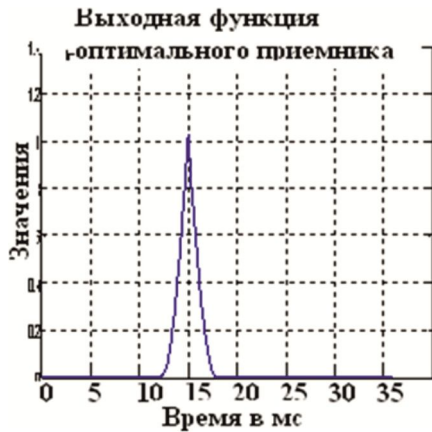


Рис. 2. Зависимость выходной функции оптимального приемника от времени при отношении сигнал/шум 5 дБ. Значение максимума определяет псевдоэнергию сигнала. А его положение – время приема

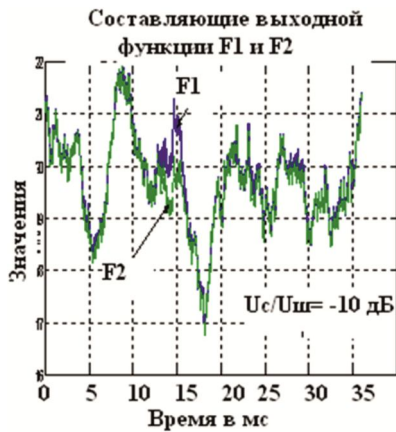


Рис. 3. Зависимость от времени составляющих f_1 и f_2 выходной функции оптимального приемника при отношении сигнал/шум -10 дБ

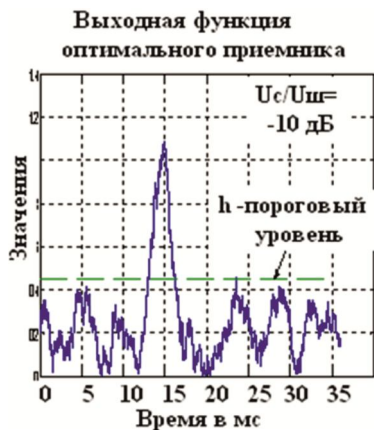


Рис. 4. Зависимость выходной функции оптимального приемника от времени при отношении сигнал/шум -10 дБ

На рис. 5 представлена статистика оценок амплитуды и времени приема сигнала, полученная на основе оптимального приемника (4). Отмечен пороговый уровень (пунктир) и, большой точкой, модельное значение амплитуды и времени приема сигнала. Точность оценок времени приема составляет ± 150 мкс, точность оценок

амплитуд составляет ± 20 %. Вероятность обнаружения по 30 независимым реализациям равна 100 %.

Статистика амплитуд и времени приема

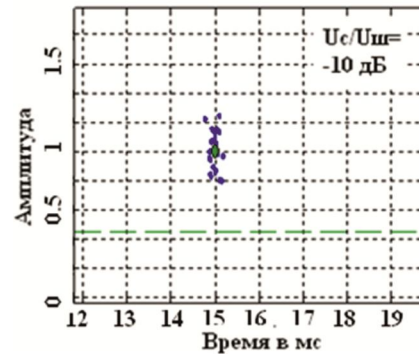


Рис. 5. Статистика оценок амплитуды и времени приема сигнала, полученная с помощью оптимального приемника (4) при модельном значении амплитуды 1

На рис. 6. показана подобная статистика при уменьшении амплитуды сигнала в 2 раза. Вероятность обнаружения равна ≈ 87 %. Четыре точки, амплитуды которых меньше порогового уровня (пунктир), определяются шумовыми максимумами. Они исключаются пороговым уровнем из дальнейшего рассмотрения.

Рассмотрим случай, когда в принятой реализации содержатся два радиоимпульса. Модельные значения параметров следующие: амплитуды 2 и 1,9; время приема 3,5 и 4 мс, длительность радиоимпульсов 3 мс, интервал дискретизации 3 мкс. В области неортогональности, когда сигналы частично перекрываются во времени, в зависимости от разности фаз и соотношения амплитуд (явление интерференции), сигналы или усиливают друг друга или ослабляют.

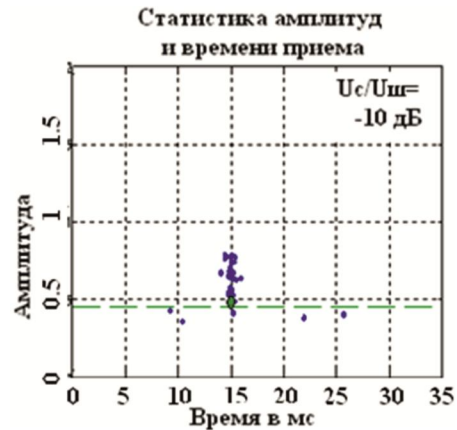


Рис. 6. Статистика времени приема и амплитуды сигнала, полученная с помощью оптимального приемника (4) при модельном значении амплитуды 0,5

В результате вероятность обнаружения меняется. На рис. 7 показан случай взаимного подавления сигналов в принятой реализации (верхняя реализация). Отмечается лишь наличие в реализации части первого и части второго сигнала. Совместная часть двух сигналов исчезает. В этом случае, оценивая амплитуды сигналов и времена их приема в точке минимума функционала правдоподобия, можно получить отдельные реализации $\hat{y}_1(t)$ (средняя реализация, рис. 7) и $\hat{y}_2(t)$ (нижняя реализация,

рис.7 и сравнить их.

$$\hat{y}_1(t) = \hat{y}(t) - \hat{U}_2 \left(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2 \right) \hat{S} \left(\vec{\lambda}_2, t \right);$$

$$\hat{y}_2(t) = \hat{y}(t) - \hat{U}_1 \left(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2 \right) \hat{S} \left(\vec{\lambda}_1, t \right) \hat{y}_2(t) =$$

$$= \hat{y}(t) - \hat{U}_1 \left(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2 \right) \hat{S} \left(\vec{\lambda}_1, t \right).$$

Рис. 7 иллюстрирует преимущество предлагаемого метода обработки. В результате решения задачи оценки параметров двух неортогональных сигналов, энергия сигналов в реализациях $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ оказывается больше, чем энергия сигналов в реализации $\hat{y}(t)$

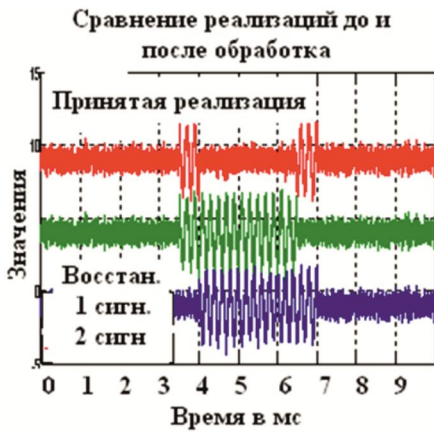


Рис. 7. Сравнение принятой реализации, содержащей совокупность двух сигналов, и двух реализаций после обработки с подавлением одного из сигналов

Следовательно, задача обнаружения будет решена более эффективно. При проведении корреляционной обработки трех реализаций $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$ преимущество предлагаемого метода обработки становится очевидным (рис. 8).

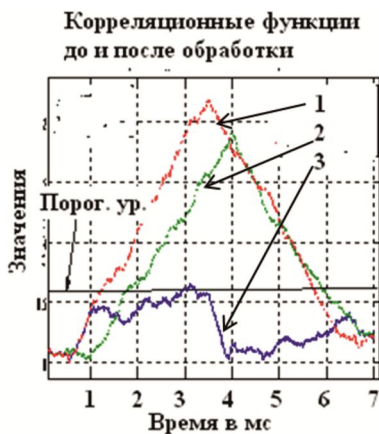


Рис. 8. Корреляционные функции трех реализаций $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$ при решении задачи обнаружения совокупности двух сигналов

Максимум корреляционной функции $\hat{y}(t)$, содержащей два неортогональных сигнала, оказывается много ниже, чем максимумы корреляционных функций реализаций $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$, содержащие эти сигналы по отдельности. На рис. 8 корреляционные функции трех реализаций показаны при отношении сигнал/шум –

20 дБ. На этом же рисунке отмечен пороговый уровень $h = 3\sigma$, определенный по уровню шума (СКО шума σ). Максимум корреляционной функции принятой реализации $\hat{y}(t)$ практически не дает возможности обнаружить наличие сигналов. Максимумы корреляционных функций реализаций $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ существенно превышают пороговый уровень. Задача раздельного обнаружения первого и второго сигналов решается вполне успешно.

На рис. 9 представлена статистика времени приема сигналов и статистика амплитуд сигналов, оцененных по реализациям $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$. Статистика лучше отражает возможность решения задачи раздельного обнаружения сигналов.

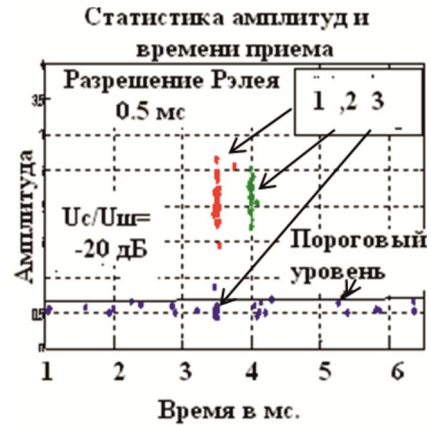


Рис. 9. Статистика времени приема и статистика амплитуд, полученная по трем реализациям $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$

Как следует из рисунка вероятность обнаружения сигналов в реализациях $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ практически 100 %. Вероятность обнаружения совокупности сигналов по реализации $\hat{y}(t)$ не превышает 10 %. На рис. 10 показан случай, когда в принятой реализации $\hat{y}(t)$ находится лишь один сигнал, а в копии содержится два сигнала. В этом случае оценки амплитуд второго сигнала имеют значения близкие к шумовым максимумам и их можно исключить за счет порогового уровня.

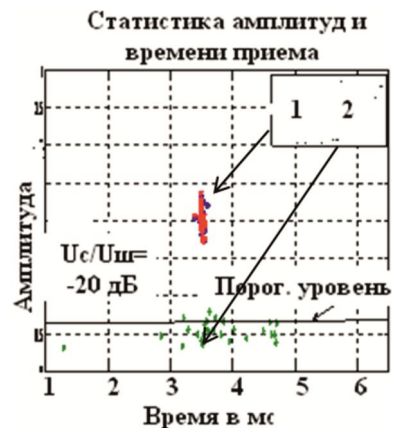


Рис. 10. Статистика времен приема и амплитуд сигналов при условии, что в принятой реализации $\hat{y}(t)$ находится лишь один сигнал.

Следовательно, вероятность обнаружения совокупности сигналов, определенная на основании реализации $\hat{y}(t)$, является функцией разности фаз и соотношения

амплитуд сигналов. Вероятность обнаружения сигналов на основании реализаций $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ не зависит от разности фаз и соотношения амплитуд. Это решение оказывается более устойчивым. Ложные (лишние) решения исключаются из рассмотрения с помощью порогового уровня. Приведем блок – схему оптимального приемника (рис. 11). По входной принятой реализации

$\hat{y}(t)$ определяются параметры: $\hat{\sigma}$, \hat{U}_1 , \hat{U}_2 , $\hat{\lambda}_1$, $\hat{\lambda}_2$ – дисперсия шума на входе приемника, комплексные амплитуды первого и второго сигналов, времена приема первого и второго сигналов. Эти данные оцениваются в области реализации, где нет сигнала, в переходной области, в области, где есть сигнал. Они позволяют получить реализации $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ в соответствии с выражениями (8), которые содержат информацию о первом и, соответственно, втором сигнале.

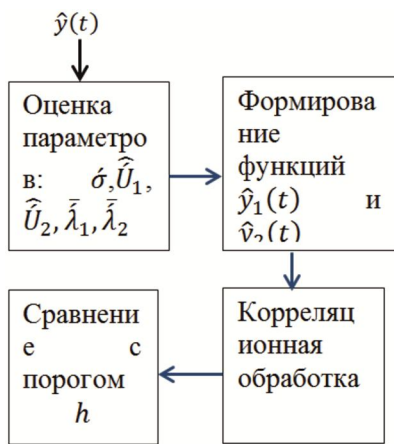


Рис. 11. Блок-схема приемника-обнаружителя двух сигналов

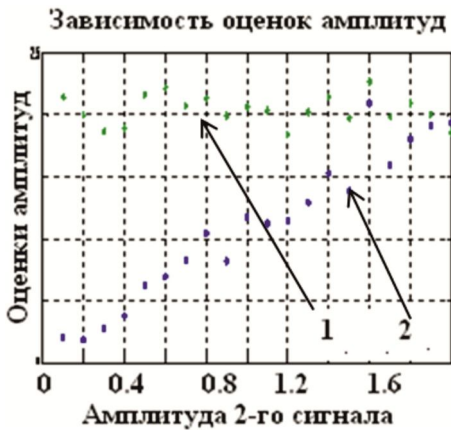


Рис. 12. Зависимость оценок амплитуд первого и второго сигналов в зависимости от линейно меняющейся амплитуды второго сигнала

В следующем блоке реализуется корреляционная обработка реализаций $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$. Максимумы корреляционных функций сравниваются с пороговым значением и, если они превышают пороговое значение, то принимается решение о наличии одного или двух сигналов в принятой реализации $\hat{y}(t)$. Отличительной особенностью решения задачи обнаружения двух или нескольких сигналов является оценка параметров по принятой реализации вне зависимости от наличия сигналов в этой реализации. Информация об амплитуде

сигналов и оценка среднеквадратичного отклонения шума позволяют оценить вероятность обнаружения сигналов. Приведем результаты модельного эксперимента.

Приняты следующие параметры: амплитуды $U_1 = 2$ и длительность сигналов 3 мс, время приема 3,5 мс и 4 мс. (неортогональные сигналы). Амплитуда второго сигнала меняется в эксперименте в заданных пределах. В результате можно получить последовательность оценок амплитуд первого и второго сигналов. Эти оценки показаны на рис. 12.

При отношении сигнал/ шум на входе приемника - 15 дБ (15 дБ на выходе приемника) СКО оценок амплитуд небольшое, на уровне 0,18. Это позволяет подставить оценки амплитуд в выражение для вероятности обнаружения сигналов при пороговом значении

$h = 3\sigma / \sqrt{N}$. В результате на экране индикатора информация о решении задачи обнаружения двух сигналов представляется в виде вероятности обнаружения сигналов (рис. 13). Линия на уровне 0,5 определяет значение вероятности обнаружения, равную 50%. Точки выше этой линии указывают на обнаружение сигналов с соответствующей вероятностью. Разброс значений вероятности обнаружения можно считать незначительным. Первый сигнал имеет модельное значение амплитуды $U_1 = 2$ и вероятность его обнаружения не ниже 0,85. Второй сигнал меняет свою амплитуду от 0,1 до 3. В результате сигнал обнаруживается при амплитуде $U_2 = 0,75$ с вероятностью 0,6.

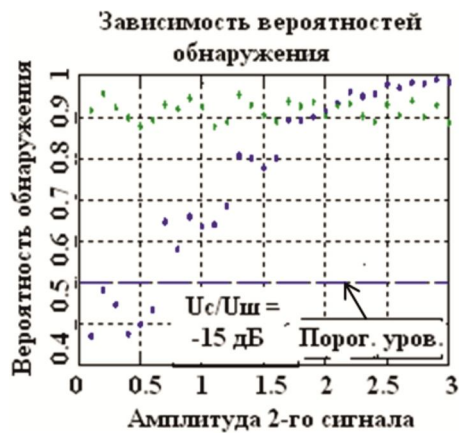


Рис. 13. Вероятности отдельного обнаружения двух сигналов в принятой реализации

Следует отметить, что сигналы в данной реализации неортогональны по времени приема. Рэлеевское разрешение определяется временем 300 мкс. Сигналы в реализации имеют различие во времени приема 50 мкс. Разрешение увеличено в 6 раз по сравнению с Рэлеевским разрешением.

Таким образом, задача обнаружения двух сигналов, содержащихся в принятой реализации, успешно решена. Решение основано на основе анализа поверхности преобразованного функционала правдоподобия. Вероятность обнаружения является случайной величиной. Однако при допустимых вариациях ее значение можно определять на индикаторе в режиме мониторинга (скользящей обработки).

1. Предложена новая структура оптимального приемника-обнаружителя сигналов. Она позволяет проводить минимизацию функции потерь, при решении задачи обнаружения совокупности сигналов с неизвестными параметрами и обеспечивает отдельную оценку вероятности обнаружения сигналов.

2. Сделан вывод: структура предложенного оптимального приемника расширяет возможности решения задачи обнаружения совокупности сигналов, содержащихся в принятой реализации. Она обеспечивает решение указанной задачи в области неортогональности сигналов.

3. Приведены доказательства того, что нет необходимости в постановке многоальтернативной задачи обнаружения сигналов. Решение о наличии сигналов в реализации принимается на основе совокупной энергии сигналов и дисперсии шума. Нет необходимости в оценке количества сигналов в принятой реализации. Достаточным является условие, что в копии содержится больше сигналов, чем в принятой реализации. Амплитуды «лишних» сигналов не превышают амплитуды шумовых максимумов в реализации.

4. Показано, что структура оптимального приемника позволяет установить на индикаторе шкалу, определяющую вероятность отдельного обнаружения сигналов, содержащихся в принятой реализации.

Литература

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.-320 с.
3. Пахотин В. А., Власова К.В., Бессонов В.А., Строков В.И., Бабинович А.И., Шустов Э.И. Технология цифровой обработки простых и широкополосных сигналов на основе функционала правдоподобия. (Пленарное заседание) Доклады 18-й Международной конференции DSPA-2016, серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Т. 1, Москва, Россия, с.13-25.
4. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. К.; Изд-во: М.: Иностранной литературы, 1963.
5. Сосулин Ю.Г. Обнаружение сигналов на фоне произвольных помех и обесцвечивающие фильтры. Известия АН СССР. Техническая кибернетика, 1974, №1. С.188-195.
6. Трифонов А.П., Корчагин Ю. Э., Литвинов Е.В. Алгоритмы обнаружения сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью на фоне белого шума. Сборник докладов XIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2007. – Т. 1. – С.51-60.
7. Трифонов А.П. Прием сигнала с неизвестной длительностью на фоне белого шума. Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 1. С.435-438
8. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986.
9. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1974. – 360 с.