

Е. Н. БУЙЛОВ, А. С. СОЛОНАР

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТАЦИИ К УСЛОВИЯМ НАБЛЮДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ СИГНАЛА

Рассматривается структурная схема мобильного (носимого либо подвижного) энергетического обнаружителя сигнала, в которой для стабилизации уровня ложных тревог при быстром изменении сигнально-помеховой обстановки (например, вызванном перестройкой параметров приемного устройства, воздействием внешних помех и др.) используется адаптивный к условиям наблюдения алгоритм определения порога обнаружения [1]. Обнаружитель позволяет в реальном масштабе времени строить нормированную гистограмму распределения оценок мощности фоновой помехи и рассчитывать ее параметры. Чтобы обеспечить требуемый уровень вероятности ложной тревоги, в обнаружителе применяется треугольная аппроксимация «хвоста» закона распределения фоновой помехи совместно со сглаживанием оценок порога обнаружения. Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке мощности фоновой помехи в различных условиях наблюдения. Проведен сопоставительный анализ расчетов вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения при использовании критерия Неймана–Пирсона и адаптивного алгоритма определения порога обнаружения.

Ключевые слова: обнаружитель, адаптация, условия наблюдения, спектр, гистограмма, вероятность ложной тревоги, порог обнаружения.

Введение

На сегодняшний день защита от беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является весьма актуальной проблемой, обусловленной широким спектром их применения: например, для несанкционированного наблюдения за важными объектами, ретрансляции данных между удаленными абонентами сетей связи, проведения терактов и диверсий (доступ за периметр охраняемых объектов, препятствование воздушному движению в аэропортах), перемещения запрещенных грузов (оружия, наркотиков), в военном деле (ведение разведки, слежение за объектами, корректировка огня, нанесение ударов) и др. [2]. Ввиду этого при разработке современных средств противодействия БПЛА предъявляются все более строгие требования к спектру их технических возможностей, эргономике, реализуемости и стоимости составных элементов.

Тем не менее в ряде случаев при выполнении поставленных задач в условиях априорно неопределенной сигнально-помеховой обстановки возникают сложности в выяв-

Буйлов Евгений Николаевич. Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» (Республика Беларусь).
Солонар Андрей Сергеевич. Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

лении источника радиоизлучения (ИРИ) (рис. 1) [3–6]. Для решения этой проблемы на практике часто используют энергетический обнаружитель, который обеспечивает измерение энергии принятого сигнала за время наблюдения, сравнение уровня полученной энергии с заданной пороговой величиной и на основании этого фиксирует наличие или отсутствие неизвестного сигнала [7, 8]. Порог обнаружения определяется с помощью критерия Неймана–Пирсона (НП), т.е. при заданной вероятности ложной тревоги (ВЛТ) вероятность правильного обнаружения (ВПО) максимально возрастает [9].

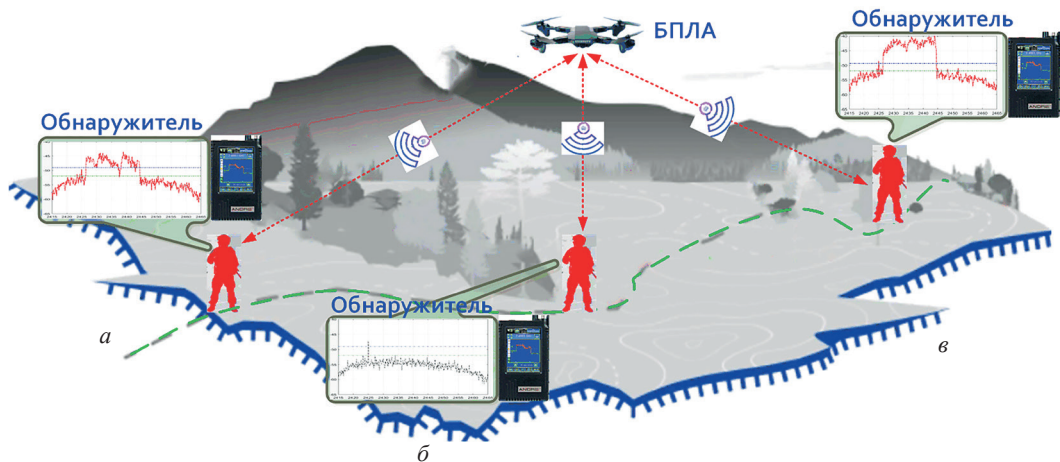


Рис. 1. Пример спектра принятого сигнала, отображаемого на индикаторе оператора:
а) спектр сигнала от ИРИ наблюдается частично; б) не наблюдается; в) наблюдается отчетливо

Вместе с тем при непараметрической априорной неопределенности закон распределения принятого сигнала неизвестен, поскольку его нельзя описать конечным числом параметров. При этом класс допустимых распределений может содержать большое количество нормированных функций, не соответствующих однозначно какой-либо области пространства [10]. Кроме того, главным недостатком энергетического обнаружителя является зависимость порога обнаружения от неизвестной в общем случае спектральной плотности мощности шума наблюдения, что не гарантирует сохранения постоянного уровня ложных тревог при изменяющейся интенсивности помех [11, 12].

В работах [1, 13] рассмотрен один из способов реализации адаптивного к быстро изменяющейся обстановке алгоритма определения порога обнаружения, что позволяет стабилизировать ВЛТ. В то же время остается открытым вопрос об оценке эффективности применения энергетического обнаружителя, структурная схема и параметры которого могут варьироваться в зависимости от результатов анализа сигнала, принятого от ИРИ. Ответ на этот вопрос и является целью настоящего исследования.

Статья имеет следующую структуру. В первом разделе описываются алгоритм определения порога обнаружения и структурная схема адаптивного к условиям наблюдения энергетического обнаружителя ИРИ, позволяющие уменьшить рост ВЛТ при быстром изменении фоновой помехи. Во втором разделе представлены результаты экспериментальной оценки эффективности предложенного алгоритма обнаружения, проведен сопоставительный анализ расчета вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения при использовании критерия Неймана–Пирсона.

1. Адаптивный к условиям наблюдения энергетический обнаружитель сигнала

По результатам проведенных исследований [1, 7, 13, 14, 15] разработана структурная схема адаптивного к условиям наблюдения энергетического обнаружителя ИРИ, позволяющего стабилизировать ВЛТ (рис. 2).

Сигнал от ИРИ, например на частотах от 800 МГц до 6 ГГц (диапазон работы коммерческих малоразмерных БПЛА), может улавливаться всенаправленной широкополосной антенной. Он обрабатывается относительно дешевым и простым с точки зрения реализации приемопередатчиком LimeSDR, который обеспечивает предварительную фильтрацию, усиление и преобразование частоты сигнала в промежуточную. Далее сигнал подвергается аналого-цифровому преобразованию с последующей цифровой обработкой (оценивается мгновенный спектр сигнала S) и записывается в буфер (рис. 2).

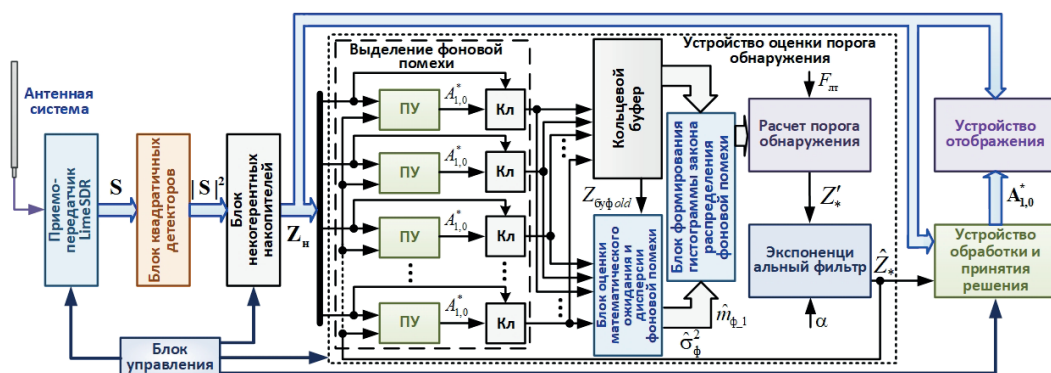


Рис. 2. Структурная схема адаптивного к условиям наблюдения энергетического обнаружителя сигнала

Последующее квадратичное детектирование $|S|^2$ и усреднение (некоррелированное накопление) мгновенного спектра за время наблюдения Z_n улучшают характеристики обнаружения при низком отношении «сигнал–шум»:

$$Z_{ni} = \frac{1}{L} \sum_{s=0}^{L-1} |S_{i,s}|^2, \quad (1)$$

где L – число усредняемых выборок мгновенного спектра; i – номер отсчета частоты (цифрового узкополосного фильтра анализатора спектра LimeSDR).

На практике априорная неопределенность количества сигналов, их мощности, шума наблюдения, характеристик антенного и радиоприемного (LimeSDR) устройств затрудняет использование классических подходов для установления порога обнаружения $\hat{Z}_*$. В связи с этим предлагается оснастить обнаружитель адаптивным к условиям наблюдения устройством оценки порога обнаружения (рис. 2), состоящим из следующих элементов: блока выделения фоновой помехи, кольцевого буфера, блоков оценки статистических характеристик и формирования гистограммы закона распределения фоновой помехи, блока оценки порога обнаружения и экспоненциального фильтра.

Фоновая помеха выделяется за счет применения порогового устройства (ПУ) в каждом частотном канале (рис. 2). На один из его входов поступает усредненная

оценка мощности принятого сигнала Z_n , а на второй – значение $\hat{Z}_*$, которое вычисляется в устройстве оценки порога обнаружения и является одинаковым для всех частотных каналов LimeSDR. Сформированное решение $A_{1,0}^*$ подается на ключ (Кл), через который проходят отсчеты спектра, не превысившие порог ($Z_n < \hat{Z}_*$), а остальные обнуляются ($Z_n \geq \hat{Z}_*$) (рис. 2):

$$Z_\phi = \begin{cases} 0, & \text{если } Z_n \geq \hat{Z}_* \\ Z_n, & \text{если } Z_n < \hat{Z}_* \end{cases}. \quad (2)$$

Для оценки статистических характеристик фоновой помехи используется кольцевой буфер (рис. 2), где хранятся оценки ее мощности Z_ϕ , не превысившие порог $\hat{Z}_*$. Размер буфера обратно пропорционален ВЛТ $F_{\text{лт}}$ и может определяться в соответствии с выражением $N_{\text{буф}} = k_h / F_{\text{лт}}$, где $k_h \leq 10$ – коэффициент, обеспечивающий достаточный размер выборки для оценки математического ожидания и дисперсии фоновой помехи. Как правило, на практике ВЛТ составляет $F_{\text{лт}} = 10^{-3} \dots 10^{-6}$, тогда, например, для $F_{\text{лт}} = 10^{-3}$ и $k_h = 10$ размер кольцевого буфера составит $N_{\text{буф}} = 10^4$.

Следует отметить, что буфер заполняется последовательно с момента включения обнаружителя. В последующем его обновление происходит путем перезаписи наиболее старой оценки $Z_{\text{буф old}}$ на новую Z_ϕ и запоминания указателя номера ячейки для дальнейшего обновления. Опрос частотных каналов осуществляется поочередно до момента достижения последнего канала.

В соответствии с теоремой Чебышева математическое ожидание $\hat{m}_{\phi 1}$ оценивается по выборочному среднему (большая выборка) [16]:

- на этапе включения

$$\hat{m}_{\phi 1} = \frac{1}{N_{\text{буф}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{буф}}-1} Z_{\phi i}; \quad (3)$$

- на этапе инициализации (подготовка обнаружителя к работе)

$$\hat{m}_{\phi 1} = \hat{m}_{\phi 1 \text{ old}} + \frac{Z_\phi - Z_{\text{буф old}}}{N_{\text{буф}}}, \quad (4)$$

где $\hat{m}_{\phi 1 \text{ old}}$ – полученная на предыдущем шаге оценка математического ожидания мощности фоновой помехи.

Дисперсия мощности фоновой помехи $\hat{\sigma}_\phi^2$ описывается выражением ее выборочной оценки [16]

$$\hat{\sigma}_\phi^2 = \hat{m}_{\phi 2} - (\hat{m}_{\phi 1})^2, \quad (5)$$

где $\hat{m}_{\phi 2}$ – математическое ожидание квадрата оценки мощности фона:

- на этапе включения

$$\hat{m}_{\phi 2} = \frac{1}{N_{\text{буф}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{буф}}-1} (Z_{\phi i})^2; \quad (6)$$

- на этапе инициализации (подготовка обнаружителя к работе)

$$\hat{m}_{\phi 2} = \hat{m}_{\phi 2 \text{ old}} + \frac{(Z_\phi)^2 - (Z_{\text{буф old}})^2}{N_{\text{буф}}}, \quad (7)$$

где $\hat{m}_{\phi 2 \text{ old}}$ – полученная на предыдущем шаге оценка математического ожидания квадрата мощности фоновой помехи.

Предложенный подход позволяет в реальном масштабе времени обновлять оценки математического ожидания и дисперсии, а также сократить количество операций, что значительно уменьшает нагрузку на вычислительное устройство.

В таком случае на этапе инициализации порог обнаружения определяется в соответствии с выражением

$$\hat{Z}_* = \hat{m}_{\phi 1} + 3\sqrt{\hat{\sigma}_{\phi}^2} \quad (8)$$

при включении обнаружителя $\hat{Z}_* = 0$. При этом кольцевой буфер заполняется оценками мощности не только шума, но и сигнала (при их наличии). После оценки статистических характеристик (выражения (4) и (5)) уровень порога обнаружения определяется по формуле (8). Следует отметить, что продолжительность этапа инициализации может достигать 10-15 итераций (циклов полного обновления кольцевого буфера) ввиду возможного присутствия в принятой реализации сигналов от ИРИ.

Для определения порога обнаружения $\hat{Z}'_*$ по заданной ВЛТ $F_{\text{лт}}$ чаще используется подход, связанный с построением нормированной гистограммы достаточной статистики при условии справедливости гипотезы H_0 (порог обнаружения не превышен, т.е. $Z_{\phi} < \hat{Z}_*$):

$$\hat{Z}'_* = \Delta Z_{\phi} M = \Delta Z_{\phi} \arg \min_{\mu} \left| \sum_{i=N_{\text{инт}}-\mu}^{N_{\text{инт}}-1} P(Z_{\phi i}) - F_{\text{лт}} \right|, \quad (9)$$

где ΔZ_{ϕ} – ширина интервала гистограммы;

$N_{\text{инт}}$ – общее количество интервалов, в течение которых накапливаются оценки мощности фоновой помехи;

M – количество интервалов, для которых справедливо условие $\sum_{i=N_{\text{инт}}-M}^{N_{\text{инт}}-1} P(Z_{\phi i}) \approx F_{\text{лт}}$;

$P(Z_{\phi i})$ – частота попадания оценки мощности фоновой помехи в i -й интервал.

Тем не менее нестабильность фоновой помехи не обеспечивает постоянного уровня ложных тревог, что ухудшает характеристики обнаружения [1, 13].

Указанный недостаток в [1] предлагается устранить путем треугольной аппроксимации «хвоста» нормированной гистограммы значений $Z_{\phi} P(Z_{\phi i})$ (при $\sum_{i=0}^{N_{\text{инт}}-1} P(Z_{\phi i}) = 1$) ввиду его наименьшей зависимости от шума наблюдения (рис. 3).

Далее в соответствии с выражением (9) рассчитывается начальный порог обнаружения $\hat{Z}'_*$ (рис. 3). Участок нормированной гистограммы от $\hat{Z}'_*(N_{\text{инт}} - M)$ до $Z_{\phi \text{ max}}(N_{\text{инт}} - 1)$, где $Z_{\phi \text{ max}}$ – максимальное значение оценки мощности фоновой помехи, которое аппроксимируется треугольником (рис. 3). Размер его нижнего катета составляет $M\Delta Z_{\phi}$, а вертикального – $P(Z_{\phi(N_{\text{инт}}-M)})$.

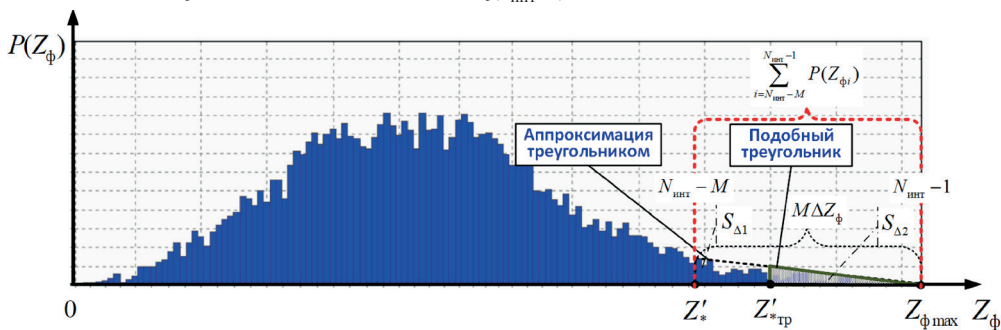


Рис. 3. Гистограмма распределения оценок мощности фоновой помехи

В таком случае необходимо найти подобный треугольник, площадь которого будет равна требуемому значению ВЛТ, т.е. $S_{\Delta 2} = F_{\text{лт}}$ (рис. 3). С помощью теоремы подобия треугольников можно рассчитать порог обнаружения $\hat{Z}'_{*\text{тр}}$ по формуле [1]

$$\hat{Z}'_{*\text{тр}} = \sqrt{\frac{S_{\Delta 2} \hat{Z}'^2}{S_{\Delta 1}}} = \sqrt{\frac{2F_{\text{лт}} (\Delta Z_{\phi} M)^2}{P(Z_{\phi(N_{\text{шт}}-M)}) \Delta Z_{\phi} M}} = \sqrt{\frac{2F_{\text{лт}} (\Delta Z_{\phi} M)}{P(Z_{\phi(N_{\text{шт}}-M)})}}, \quad (10)$$

где $S_{\Delta 1} = P(Z_{\phi(N_{\text{шт}}-M)}) M \Delta Z_{\phi} / 2$ – площадь аппроксимирующего треугольника.

Заключительным этапом в определении порога обнаружения является экспоненциальное сглаживание (рис. 2), алгоритм работы которого на k -м шаге обзора имеет следующий вид (основной алгоритм определения порога обнаружения):

$$\hat{Z}_{*k} = (1 - \alpha) Z'_{*\text{тр}} + \alpha \hat{Z}_{*(k-1)}, \quad (11)$$

где $\alpha = (0,4 \dots 0,8)$ – коэффициент усиления фильтра (уточняется на этапе практической реализации); $\hat{Z}_{*(k-1)}$ – оценка порога обнаружения, полученная на предыдущем $(k-1)$ шаге сглаживания.

Таким образом, предложенный алгоритм определения порога обнаружения включает следующие этапы: адаптивное выделение фоновой помехи, обновление кольцевого буфера, выборочную оценку математического ожидания и дисперсии, формирование нормированной гистограммы распределения мощности фоновой помехи, вычисление порога обнаружения с использованием треугольной аппроксимации «хвоста» закона распределения, экспоненциальное сглаживание оценок порога обнаружения. Алгоритм позволяет стабилизировать ВЛТ при изменении условий наблюдения.

2. Результаты оценки эффективности адаптивного к условиям наблюдения алгоритма определения порога обнаружения

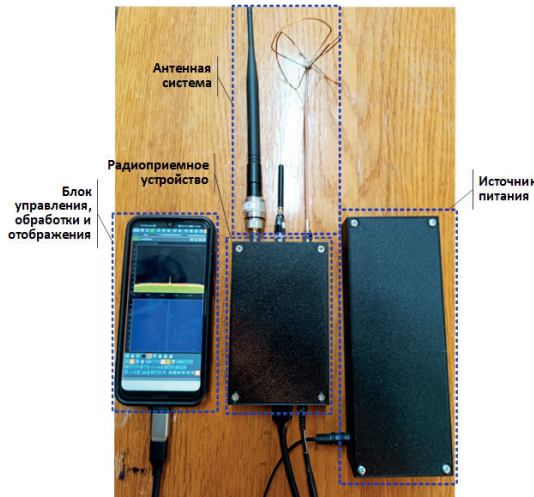


Рис. 4. Вариант реализации макета системы обнаружения ИРИ

В соответствии с рассмотренным выше адаптивным к условиям наблюдения алгоритмом определения порога обнаружения (выражения (10) и (11)) разработан макет системы обнаружения ИРИ (рис. 4). В состав макета входят: антенна, радиоприемное устройство, блок управления, обработки и отображения (выбор режима выдачи информации об обнаружении, анализируемого диапазона частот, обнаружение ИРИ, отображение и запись мгновенного спектра принятого сигнала), источник питания. Управление макетом осуществляется с внешнего устройства (компьютера либо смартфона), подключенного через кабель USB 3.0. Все функции управления и отображения ре-

ализованы в рамках разработанного программного обеспечения. Интерфейс системы оптимизирован для эффективного выполнения задач обнаружения ИРИ в сложной оперативной обстановке.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма определения порога обнаружения ИРИ был проведен ряд экспериментальных исследований (рис. 4).

Эксперимент №1 (рис. 5, а). Макет системы обнаружения перемещался по открытой местности с постоянной скоростью на расстоянии 50–150 м от БПЛА (основные характеристики представлены в табл. 1).

Эксперимент №2 (рис. 5, б). Макет перемещался по лесистой местности с постоянной скоростью на расстоянии 150–300 м от БПЛА. На пути следования встречались неглубокие овраги, кустарники, деревья.

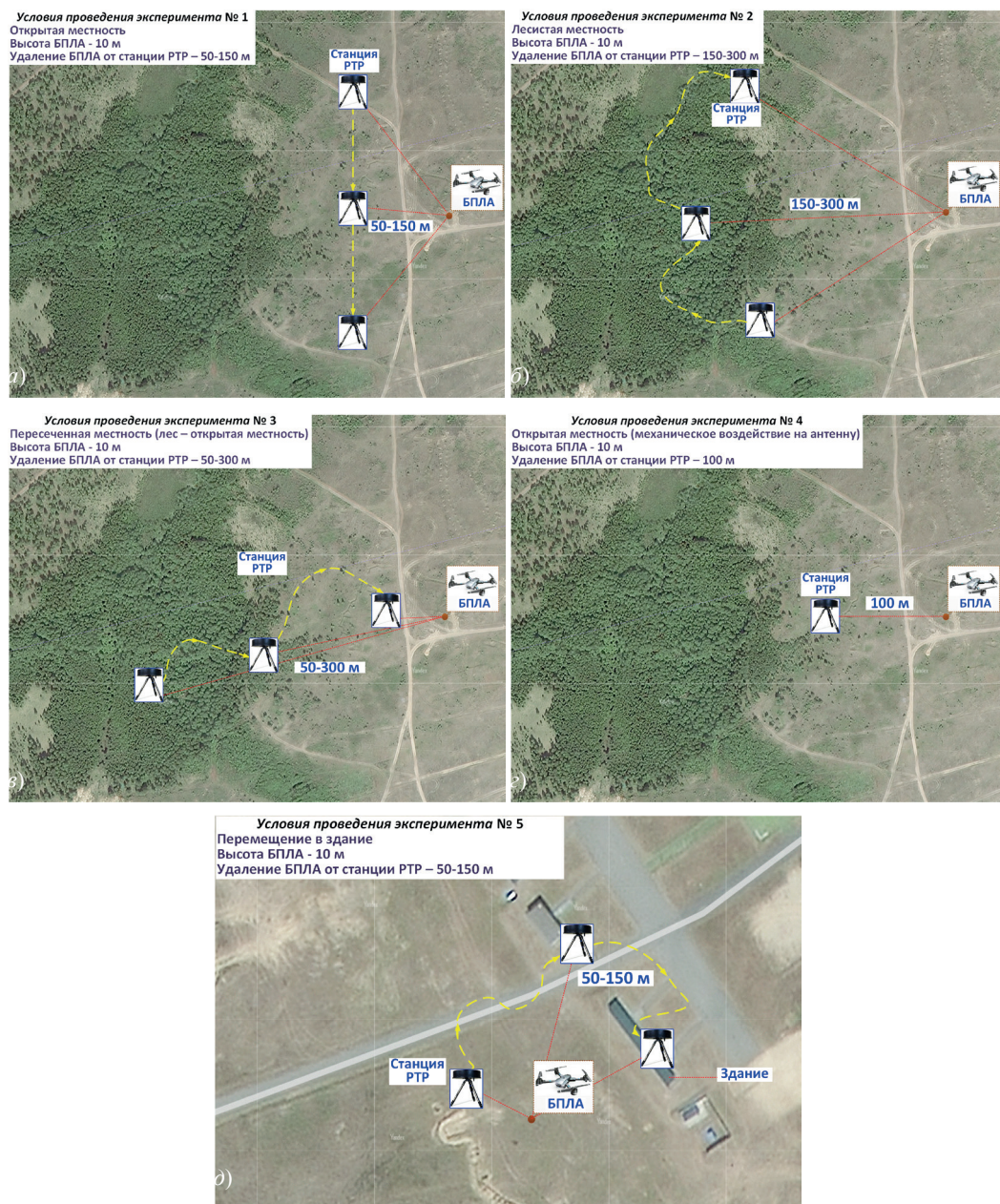


Рис. 5. Выполненные экспериментальные исследования:

а) эксперимент №1; б) эксперимент №2; в) эксперимент №3; г) эксперимент №4; д) эксперимент №5

Эксперимент №3 (рис. 5, в). Макет перемещался по пересеченной местности (переход из леса на открытое пространство) с постоянной скоростью на расстоянии 50–300 м от БПЛА. На пути следования встречались неглубокие овраги, кустарники, деревья.

Эксперимент №4 (рис. 5, з). Макет был неподвижен и находился на открытой местности на расстоянии 100 м от БПЛА. Антенна подвергалась механическому воздействию (например, к ней прикасались руками или ветками деревьев, прислоняли к одежде либо корпусу автомобиля, изгибали и др.).

Эксперимент №5 (рис. 5, д). Макет перемещался с открытой местности в здание с постоянной скоростью на расстоянии 50–150 м от БПЛА.

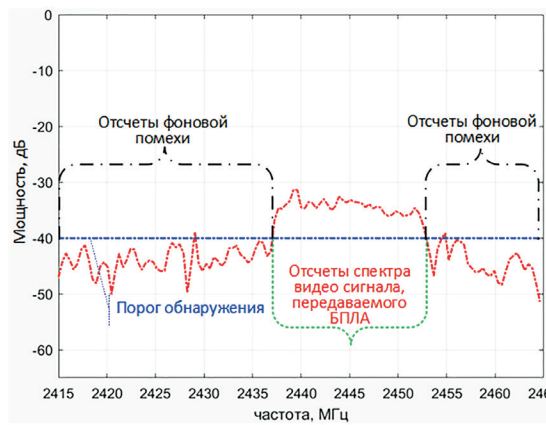


Рис. 6. Спектрограмма мобильной системы обнаружения

Оператор БПЛА находился за укрытием, что снижало влияние сигнала канала управления на оценку эффективности алгоритма обнаружения. Мощность фоновой помехи оценивалась по результатам усреднения мгновенных мощностей принятого сигнала в частотных каналах, в которых отсутствовал полезный сигнал (300 отсчетов) (рис. 6). Решение об обнаружении сигнала принималось во всех случаях превышения порога обнаружения и не зависело от расстояния до БПЛА.

Средние ВЛГ ($\bar{F}_{\text{лт}}$) и ВПО ($\bar{D}$) за время наблюдения определялись по ре-

зультатам $N_{\text{эксп}} = 1000$ экспериментов, соответствующим доверительной вероятности 0,9 (вероятность, с которой полученные экспериментальные данные можно считать достоверными) и погрешности измерений не более 10% (отклонение измеренного значения $F_{\text{лт изм}}(D_{\text{изм}})$ от ее истинного значения $F_{\text{лт ист}}(D_{\text{ист}})$ [9, 17]).

Исходные данные эксперимента представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Исходные данные эксперимента

Наименование	Значение
Тип БПЛА	DJI Phantom 4
Диапазон рабочих частот БПЛА	2420–2440 МГц
Высота зависания БПЛА	10 м
Скорость движения БПЛА	0 м/с
Скорость движения системы обнаружения	2–4 км/ч
Удаление системы обнаружения от БПЛА	50–300 м
Диапазон рабочих частот обнаружителя	2415–2465 МГц
Ширина полосы частот одновременного анализа	50 МГц
Время накопления мгновенных спектров сигналов ($L = 20$)	204,8 мкс
Размер кольцевого буфера ($N_{\text{буф}}$)	3000

Наименование	Значение
Продолжительность этапа инициализации порога обнаружения	10 итераций
Коэффициент усиления экспоненциального фильтра сглаживания оценок порога обнаружения (α)	0,6
Количество частотных каналов	512
Ширина полосы пропускания частотного канала	97,6 кГц
Высота подъема антенны комплекта обнаружения	1,5 м
Тип антенной системы	Клеверная
Коэффициент стоячей волны	2
Требуемое значение ВЛТ	$F_{\text{лт}} = 10^{-3}$
Требуемое значение ВПО	$D = 0,99$
Тип радиоприемного устройства	Приемопередатчик LimeSDR [18]

На рис. 7 представлены результаты оценки мощности фоновой помехи (синяя штрихпунктирная линия), порога обнаружения, рассчитанного при помощи критерия НП $\hat{Z}_{*\text{НП}}$ (черная штриховая линия, мощность фоновой помехи оценивалась на начальном этапе проведения эксперимента) и адаптивного к условиям наблюдения алгоритма $\hat{Z}_{*\text{АД}}$ (красная непрерывная линия) для различных моментов времени.

На рис. 8 и 9 показаны результаты расчета ВЛТ и ВПО при использовании критерия НП (красная непрерывная линия) и адаптивного к условиям наблюдения алгоритма определения порога обнаружения (синяя штриховая линия).

Средние вероятности ложной тревоги ($\bar{F}_{\text{лт}}$) и правильного обнаружения ($\bar{D}$) оценивались за время наблюдения как рассчитанные в различные моменты времени усредненные значения ВЛТ ($F_{\text{лт изм } i}$) и ВПО ($D_{\text{изм } i}$) по формулам:

$$\bar{F}_{\text{лт}} = \frac{1}{N_{\text{экс}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{экс}}-1} F_{\text{лт изм } i} \quad \text{и} \quad \bar{D} = \frac{1}{N_{\text{экс}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{экс}}-1} D_{\text{изм } i}. \quad (12)$$

В табл. 2 сведены оценки мощности фоновой помехи, средних вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения (см. данные в круглых скобках), полученные за время наблюдения в различных условиях при использовании критерия НП и адаптивного алгоритма обнаружения.

Таким образом, результаты проведенного эксперимента показали, что применение адаптивного к условиям наблюдения энергетического обнаружителя ИРИ (см. рис. 2) уменьшает рост ВЛТ при быстром изменении фоновой помехи. Например, при определении порога обнаружения с помощью критерия НП при передвижении по лесу средняя ВЛТ может достигать $F_{\text{лт НП}} = 0,044$, что превышает требуемое значение ($F_{\text{лт}} = 10^{-3}$) в 43,9 раза. Механическое воздействие на антенную систему приводит к повышению $F_{\text{лт НП}}$ в 111,5 раза ($F_{\text{лт НП}} = 0,11$). Треугольная аппроксимация «хвоста» закона распределения оценок мощности фоновой помехи и последующее экспоненциальное сглаживание порога обнаружения позволяли сохранить $F_{\text{лт}}$ на нужном уровне за все время наблюдения. При аналогичных условиях наблюдения в лесистой местности $F_{\text{лт АД}} = 0,002$ (ВЛТ возросла в 2,0 раза), а при механическом воздействии на антенну $F_{\text{лт АД}} = 0,018$ (ВЛТ увеличилась в 18,2 раза). Таким образом, при определении порога обнаружения адаптивный к условиям наблюдения энер-

гетический обнаружитель ИРИ дает возможность снизить действительную ВЛТ в 4,2–22,4 раза в различных условиях наблюдения по сравнению с критерием НП.

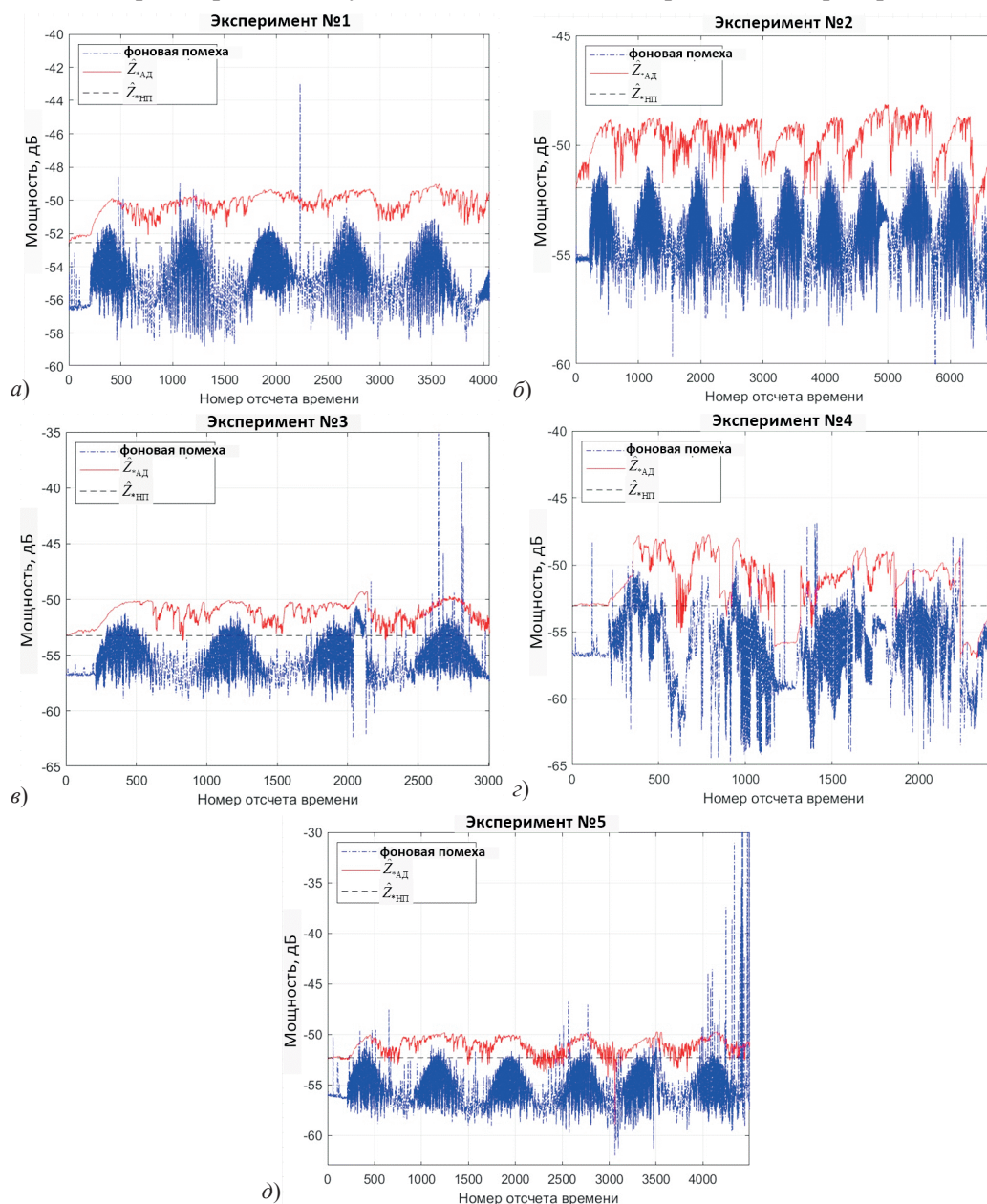


Рис. 7. Фрагмент оценки мощности фона наблюдения:

- а) открытая местность; б) передвижение по лесу;
 в) передвижение по пересеченной местности (переход из леса на открытую местность);
 г) механическое воздействие на антенну; д) перемещение с открытой местности в здание

Несмотря на то что предложенный энергетический обнаружитель ИРИ обеспечивает стабилизацию уровня ложных тревог при быстром изменении сигнально-помеховой обстановки, в частности вызванном перестройкой параметров приемного устрой-

ства, воздействием внешних помех и др., недостатком его применения является снижение ВПО. Так, при аналогичных условиях наблюдения в лесистой местности ВПО $D_{ад} = 0,57$ (т.е. снизилась в 1,8 раза по сравнению с требуемым значением $D = 0,99$), а при механическом воздействии на антенну $D_{ад} = 0,73$ (уменьшилась в 1,4 раза). Из этого следует, что в различных условиях наблюдения при определении порога обнаружения посредством энергетического обнаружителя действительная ВПО снижается в 1,2-1,5 раза по сравнению с критерием НП.

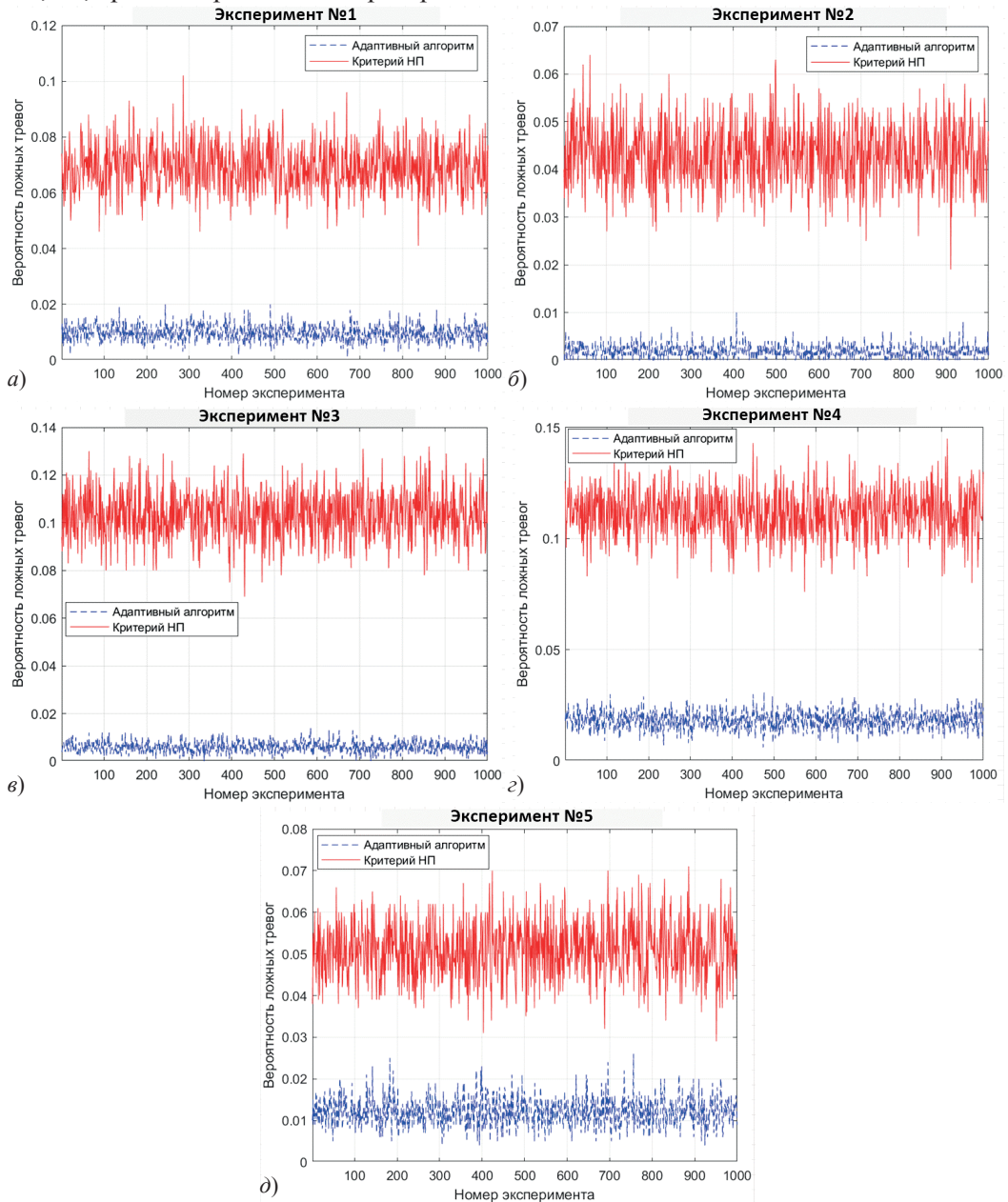


Рис. 8. Результаты оценки ВЛТ:

- а) открытая местность; б) передвижение по лесу;
 в) передвижение по пересеченной местности (переход из леса на открытую местность);
 г) механическое воздействие на антенну; д) перемещение с открытой местности в здание

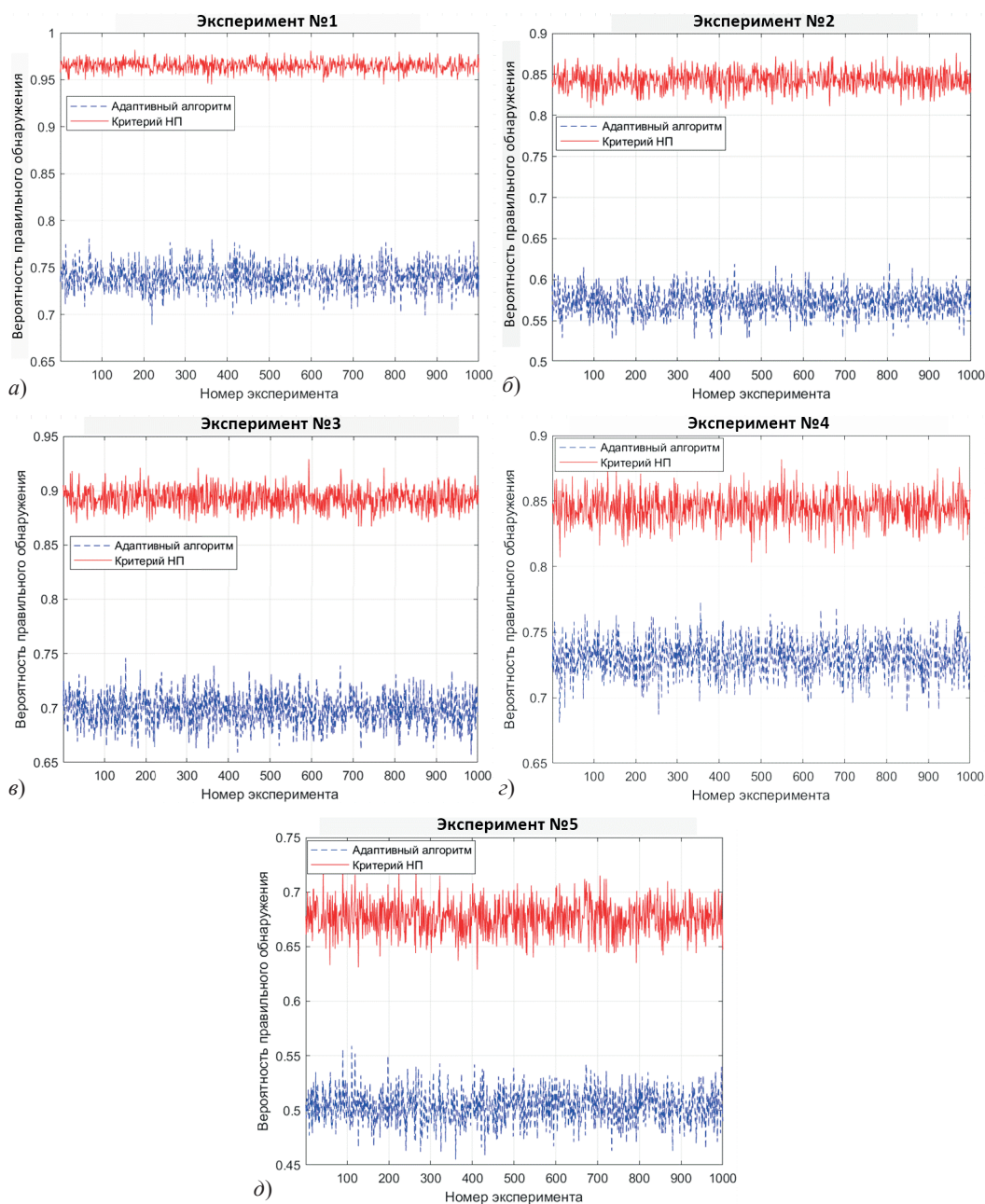


Рис. 9. Результаты оценки ВПО:

- а) открытая местность; б) передвижение по лесу;
в) передвижение по пересеченной местности (переход из леса на открытую местность);
г) механическое воздействие на антенну; д) перемещение с открытой местности в здание

На практике при быстром изменении шума наблюдения (передвижение по пересеченной местности, перемещение на автомобиле и др.) существует возможность завышать порог обнаружения вручную, при этом уменьшается вероятность ложного обнаружения. Вместе с тем указанный подход приводит к тому, что расстояние, на котором выявляется ИРИ, сокращается, а это не всегда приемлемо. В отличие

от него энергетический обнаружитель ИРИ позволяет снизить ВЛТ (до требуемого значения) и увеличить дальность обнаружения БПЛА до потенциально возможной.

Т а б л и ц а 2

Оценки мощности фоновой помехи, средних ВЛТ и ВПО

Условия проведения эксперимента	Уровень фоновой помехи, дБ		Средняя ВЛТ (ВПО) за время наблюдения		Отношение рассчитанного и требуемого значений ВЛТ $F_{лт\ нп(ад)} / F_{лт}$ (отношение требуемого и рассчитанного значений ВПО $D/D_{нп(ад)}$), раз		Отношение ВЛТ $F_{лт\ нп} / F_{лт\ ад}$ (отношение ВПО $D_{нп} / D_{ад}$), раз
	min	max	Адаптивный алгоритм	Критерий НП	Адаптивный алгоритм	Критерий НП	
Эксперимент №1 (перемещение по открытой местности)	-43	-59	0,0097 (0,74)	0,069 (0,97)	9,7 (1,4)	68,6 (1,04)	7,1 (1,3)
Эксперимент №2 (перемещение по лесистой местности)	-51	-60	0,002 (0,57)	0,044 (0,84)	2,0 (1,8)	43,9 (1,2)	22,4 (1,5)
Эксперимент №3 (перемещение по пересеченной местности)	-37	-63	0,006 (0,70)	0,10 (0,89)	6,0 (1,4)	103,9 (1,1)	17,4 (1,3)
Эксперимент №4 (механическое воздействие на антенну)	-42	-64	0,018 (0,73)	0,11 (0,84)	18,2 (1,4)	111,5 (1,2)	6,1 (1,2)
Эксперимент №5 (перемещение с открытой местности в здание)	-25	-61	0,012 (0,50)	0,051 (0,68)	12,1 (2,0)	51,0 (1,5)	4,2 (1,3)

З а к л ю ч е н и е

1. Разработан адаптивный к условиям наблюдения алгоритм определения порога обнаружения, включающий следующие этапы:

- адаптивное выделение фоновой помехи;
- обновление кольцевого буфера;
- выборочную оценку математического ожидания и дисперсии;
- формирование нормированной гистограммы распределения мощности фоновой помехи;
- вычисление порога обнаружения с использованием треугольной аппроксимации «хвоста» закона распределения и экспоненциального сглаживания оценок порога обнаружения.

2. Построен макет мобильной системы обнаружения ИРИ (рис. 4), состоящий из антенны, радиоприемного устройства, блока управления, обработки и отображения, источника питания. Управление макетом осуществляется с внешнего устройства (компьютера либо смартфона), подключенного через кабель USB 3.0. Интерфейс системы оптимизирован для эффективного обнаружения ИРИ в сложной оперативной обстановке.

3. Экспериментальные исследования подтвердили результативность применения адаптивного к условиям наблюдения энергетического обнаружителя ИРИ при быстро изменяющейся обстановке (априорная неопределенность мощности сигнала, шума наблюдения, характеристик антенного и радиоприемного устройств). В частности, использование алгоритмов (10) и (11) для определения порога обнаружения в различных условиях наблюдения способствует снижению ВЛТ в 4,2-22,4 раза по сравнению с критерием НП. Недостатком предложенного подхода, обеспечивающего стабилизацию уровня ложной тревоги при быстром изменении сигнально-помеховой обстановки, является уменьшение ВПО в 1,2-1,5 раза по сравнению с критерием НП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буйлов Е.Н., Солонар А.С., Горшков С.А. Адаптивный к условиям наблюдения энергетический обнаружитель источника радиоизлучения // Наука и военная безопасность. 2023. №4 (78). С. 20–26.
2. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научные технологии, 2020. 204 с.
3. Zheng, G., Foggy Drone Teacher: Domain Adaptive Drone Detection Under Foggy Conditions, *Drones*, 2025, no. 9, <https://doi.org/10.3390/drones9020146>.
4. Seidaliyeva, U., Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review, *Sensors*, 2024, no. 24, doi <https://doi.org/10.3390/s24010125>.
5. Ezuma, M., Detection and Classification of UAVs Using RF Fingerprints in the Presence of Interference, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2019, doi:10.1109/OJCOMS.2019.29558899.
6. Thai Binh Nguyen, Real-time Detection and Parameter Estimation of UAV/Drone Signals using Adaptive Thresholds, *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2023, doi:10.1109/ATC58710.2023.10318928.
7. Солонар А.С., Латушкин В.В., Габец С.А. Основы радиопеленгации. Основы теории измерения параметров сигналов: пособие. Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2023. 200 с.
8. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации. М.: Воен. изд-во, 1983. 456 с.
9. Подстригаев А.С. Анализ вероятностных характеристик матричного приемника с учетом неоднозначности определения частоты на стыках каналов // Доклады ТУСУРа. 2015. №4 (38). С. 17–25.
10. Сидоров Ю.Е., Шумилов А.Е. Исследование непараметрического обнаружителя сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. №6. С. 78–85.
11. Еременков А.И., Жураковский В.Н. Исследование адаптивного спектрального обнаружителя сигналов // Символ науки. 2016. №4. С. 57–63.
12. Потапов А.А. Определение порогов обнаружения радиосигналов для метода энергетического детектора // Журнал радиоэлектроники. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.3>.
13. Буйлов Е.Н., Солонар А.С. Предложения по разработке адаптивного к условиям наблюдения энергетического обнаружителя источника радиоизлучения // Радиолокация, навигация, связь (RLNC 2024): сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции в 5 т. Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2024. Т. 3. С. 53–62.
14. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / 2-е изд., испр. и доп. М.: Горячая линия – Телеком, 2022. 488 с.
15. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 640 с.

16. Вентцель Е.С. Теория вероятности: учебник для вузов / 7-е изд. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
17. Косачев И.М., Нефедов Д.С. Методики расчета показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2015. Т. 46. №1. С. 107–134.
18. LimeSDR-USB User Guide [Электронный ресурс]. URL: https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB_User_Guide (дата обращения: 27.06.2023).

Builou, E.N. and Solonar, A.S. (KB Radar, Managing company of Radar Systems Holding, Minsk, Belarus) Energy Signal Detector: Experimental Evaluation of Efficiency of Adaptation to Observation Conditions, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 1 (128), pp. 91–105.

Abstract. The paper considers the structure of a portable or mobile energy signal detector using a detection threshold determination algorithm adaptive to the observation conditions to stabilize the false alarm probability under rapid changes in the signal-to-noise ratio (for example, caused by the readjusting the receiver parameters, external interference, etc.) [1]. The detector constructs a normalized histogram of background noise power distribution and calculates its parameters in real time. To ensure the required false alarm probability, triangular approximation is applied to the tail of the background noise distribution law with smoothing of the detection threshold estimates. The article presents the results of experimental studies of the noise power under different observation conditions. A comparative analysis of the false alarm and detection probabilities obtained using the Neyman-Pearson criterion and the adaptive detection threshold algorithm in the energy detector is carried out.

Key words: detector, adaptation, observation conditions, spectrum, histogram, false alarm probability, detection threshold.

Материал поступил 10.08.2024