АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Козирацкий А. Ю.[1], Чёнгин А. В.[2], Гревцев А. И.[3]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-86-93

Ключевые слова: *лазерная локация, гетеродин, максимальное правдоподобие, оценка амплитуды, оценка частоты, квадрокоптер, обнаружение.*

Аннотация

Цель работы: *разработка алгоритмов обнаружения и оценок параметров отраженного сигнала от вращающихся винтов беспилотного летательного аппарата малого класса при зондировании лазерной локационной станцией гетеродинного типа.*

Метод исследования: *метод максимального правдоподобия.*

Результаты: *алгоритмы обнаружения и оценки параметров входных сигналов, необходимых для идентификации подсистемой лазерной разведки беспилотных летательных аппаратов малого класса в воздушном пространстве, отличаются от известных введением дополнительной процедуры подстройки фазового фронта гетеродина. Процесс формирования оценок является итерационным вследствие подстройки фазового фронта гетеродина. Оценки формируются на всем протяжении подстройки фазового фронта и хранятся в буферном устройстве. Наиболее правдоподобной считается та оценка, у которой амплитуда больше. Алгоритмы позволяют по входным реализациям получить исходные данные для методики формирования идентификации подсистемой лазерной разведки беспилотных летательных аппаратов малого класса лазерной локационной станцией гетеродинного типа. Алгоритмы позволяют оптимальным образом оценить амплитуду и частоту биений на выходе фотоприемного устройства с учетом подстройки фазового фронта гетеродина, а также определить статистические характеристики полученных оценок, что в свою очередь позволяет сформировать требования к параметрам подсистемы разведки воздушного пространства на основе использования лазерной локационной станции гетеродинного типа.*

Научная новизна: *разработаны алгоритмы обнаружения и оценок параметров отраженного от вращающихся винтов сигнала при зондировании лазерной локационной станцией гетеродинного типа беспилотного летательного аппарата малого класса.*

Введение

Существующие способы борьбы с квадрокоптерами включают средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ), предназначенные для подавления каналов управления и навигации, кинетические средства поражения (стрелковое оружие, зенитные комплексы, сетемётные устройства). Стрелковое оружие, зенитные комплексы малоэффективны против малоразмерных БЛА, а применение средств РЭБ не гарантирует физического уничтожения цели и может быть бесполезно, в случае если квадрокоптер управляется по оптоволоконному каналу. В этой связи лазерные системы поражения представляют особый интерес как высокоточные, быстро наводимые средства, обеспечивающие направленное энерговоздействие на элементы конструкции квадрокоптера.

Применение одиночных источников импульсного лазерного излучения большой мощности сопряжено с рядом физических и технических ограничений. При достижении плотности мощности излучения превышающих порог пробоя атмосферы возникает ионизация среды распространения (воздуха), что приводит к формированию плазменного канала, рассеянию и расфокусировке излучения, снижению эффективности передачи энергии к цели. Кроме того, экстремальные требования к одному лазерному излучателю (по пиковой мощности, термостабильности и ресурсу) усложняют конструкцию системы, повышают её стоимость и снижают надёжность.

В источнике [1] обоснован способ пространственного сложения электромагнитных излучений когерентных источников. Способ направлен на физическое поражение (плавление, поджигание конструктивных элементов) БЛА малого класса за счет накопления энергии от импульсных последовательностей отдельных лазерных источников. В работе [2] описана методика

1 ***Козирацкий Александр Юрьевич***, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. Воронеж, Россия. E-mail: sashfish@bk.ru

2 ***Чёнгин Александр Владимирович***, адъюнкт ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. Воронеж, Россия. E-mail: alexsvist168@mail.ru

3 ***Гревцев Александр Иванович***, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. Воронеж, Россия. E-mail: grevtsev.sanche@yandex.ru

поражения БЛА малого класса пространственно-распределенной системой источников направленной энергии большой мощности. Ключевая идея заключается в том, что при использовании отдельных источников излучения имеется возможность настроить систему так, чтобы пиковая мощность в отдельных лучах, формируемых каждым ИИ была ниже порога интенсивности, приводящей к ионизации среды распространения, обеспечивая при этом максимально возможную мощность в точке сложения импульсов (на БЛА), при заданных начальных энергетических параметрах излучателей. Кроме того, для достижения минимального времени поражения имеется возможность увеличения количества ИИ, следствием чего является увеличение мощности излучения в точке сложения импульсов. На рисунке 1 представлен вариант применения пространственно-распределенной системы направленной энергии.

В предложенной пространственно-распределённой системе направленной энергии в качестве поражающих элементов решено применять лазеры на CO_2, поскольку основными компонентами конструктивных элементов БЛА являются полимеры, у которых коэффициент поглощения излучения с длиной волны 10,6 мкм составляет $5 \cdot 10^3 – 1 \cdot 10^4$ см$^{-1}$. Благодаря очень малой глубине проникновения энергия концентрируется в тонком поверхностном слое, что обеспечивает быстрый локальный перегрев и эффективное термическое разрушение материала при минимальных энергетических затратах по сравнению с лазерами видимого и ближнего ИК-диапазона. Для обоснования режима работы источников излучения проанализировано поведение полимерных материалов, при различных длительностях импульсов воздействия. У полимерного материала есть характерное время тепловой релаксации – десятки миллисекунд. Это время, за которое тепло, внесённое в тонкий поверхностный слой, успевает заметно распространиться вглубь и частично рассеяться. Если импульсы приходят реже, чем это время (например, десятки герц), поверхность между ними ощутимо остывает. Тогда нагрев, становится пульсирующим, и значительная часть энергии теряется из-за охлаждения между импульсами. В этом режиме рост средней температуры замедляется. Когда частота повышается так, что пауза между импульсами становится существенно меньше времени тепловой релаксации (несколько миллисекунд против десятков миллисекунд), поверхность уже не успевает остывать. Импульсы начинают эффективно накапливать температуру, и нагрев по своему характеру практически не отличается от непрерывного излучения той же средней мощности. Минимальная частота, при которой наблюдается такой эффект составляет 200 Гц, при длительности импульсов 100 мкс. Учитывая это определен режим работы ИИ. Резонатор ИИ должен работать в режиме импульсной накачки. Работа в данном режиме обеспечивает требуемые параметры излучения, не подвергая отдельные источники излучения экстремальным нагрузкам, что обеспечивает надежность.

Для достижения поставленной цели – поражения БЛА, системе разведки необходимо решить задачу обнаружения его в воздушном пространстве, а именно идентифицировать цель как БЛА малого класса, и отличить от других объектов, например птиц. На основе способа представленного в работе [3], для обеспечения эффективного функционирования

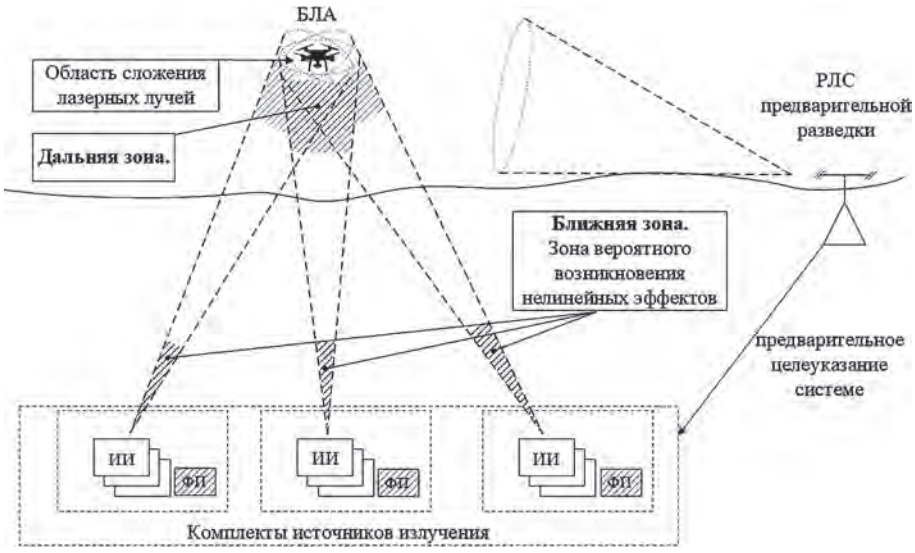

Рис. 1. Пространственно-распределенная система направленной энергии

приемо-передающей аппаратуры подсистемы разведки на основе лазерной локационной станции гетеродинного типа предлагается идентифицировать БЛА малого класса, по оценке параметров отраженного зондирующего лазерного излучения от вращающихся лопастей винтов. Предлагаемое решение отличается от известных введением в конструкцию фотоприемного устройства, с последующей оценкой амплитуды и частоты биений на выходе. Это позволяет по оценкам величин амплитуды и частоты фототоков с выхода фотоприемного устройства определить вращение винтов, способствующее повышению вероятности правильного обнаружения системы разведки воздушного пространства.

Для анализа отраженного от вращающихся винтов сигнала требуется разработка алгоритмов приема и определения его параметров, позволяющих наилучшим образом выделить полезный сигнал на фоне непреднамеренных естественных помех и собственных шумов, а также произвести наиболее точные оценки требуемых информационных параметров, ошибки определения которых не будут существенно понижать эффективность обнаружения и идентификации объекта.

Для принятия решения о том, что цель является квадрокоптером необходимо знать частоту вращения лопастей винтов. Для примера, чтобы рассчитать количество оборотов винтов БЛА малого класса, можно использовать формулу: обороты в минуту = KV × вольтаж аккумулятора (где KV это коэффициент, который показывает, сколько оборотов в минуту сделает двигатель на каждый поданный на него вольт напряжения без нагрузки). Например, если мотор с маркировкой 2400KV и используется стандартный 4S аккумулятор (полный заряд – 16,8 В), то 2400 × 16,8 = 40320 оборотов в минуту – с такой скоростью двигатель будет вращаться при полном газе. Таким образом частота вращения лопастей винта, который установлен на данном типе мотора будет составлять 672 Гц. Рассмотрим общую схему функционирования подсистемы разведки БЛА малого класса, представленную на рисунке 2.

Подсистема функционирует следующим образом. Квантовый генератор 1, формирует в направлении разведки поток импульсного лазерного излучения 2. Сгенерированное излучение поступает в передающую оптическую систему, часть мощности при помощи полупрозрачного зеркала 5 поступает на вход опорного фотодетектора (ОФД) 8. На выходе ОФД формируется управляющее напряжение, запускающее измеритель временных интервалов (ИВИ) в устройстве обработки сигналов 10.

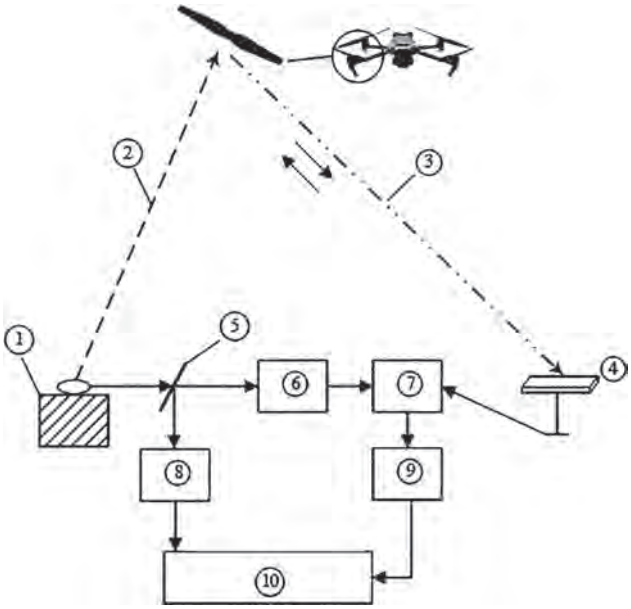

Рис. 2. Цикл разведки воздушной цели

Отраженный сигнал 3 от цели поступает на вход приемной оптической системы 4. Принимаемое оптическое излучение преобразуется в электрический сигнал фотодетектором 7, осуществляется его фотосмешение с опорным сигналом, поступившего с линии задержки 6, полученный сигнал усиливается и поступает на вход порогового детектора (ПД) 9. В случае превышения установленного порогового значения, на выходе ПД формируется управляющий сигнал, останавливающий ИВИ.

Далее в устройстве обработки сигналов, происходит оценивание вибрационных параметров. Таким образом происходит обнаружение вибрирующих объектов с использованием лазерной локационной станции гетеродинного типа.

Схема передачи части энергии передающего канала для гетеродинирования представлена на рисунке 3 [4,5].

По результатам разведки принимается решение, попадает ли обнаруженный объект под заданные параметры или нет, на основе чего принимается решение о воздействие в указанный сектор источниками излучения из состава пространственно-распределенной системой направленной энергии.

Целью работы является разработка алгоритмов обнаружения и оценки параметров сигнала при зондировании лазерной локационной станцией беспилотного летательного аппарата малого класса.

Таким образом, результаты указанных исследований в области лазерной локации повышают

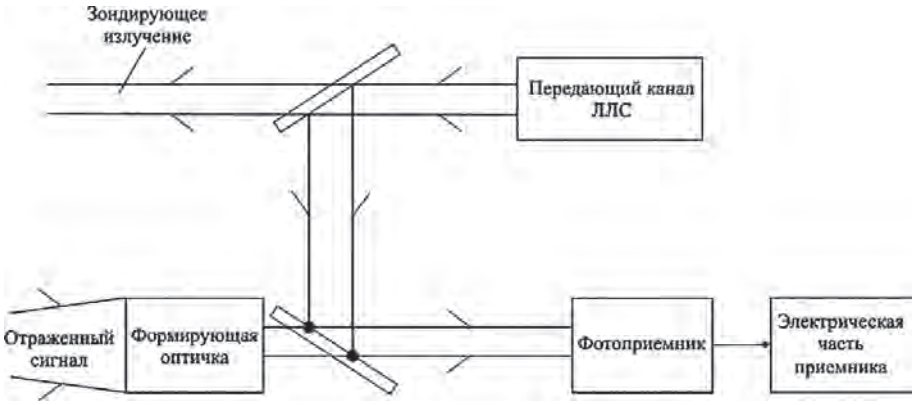

Рис. 3. Схема гетеродинирования

достоверность решения о факте обнаружения и идентификации квадрокоптера лазерной локационной станцией гетеродинного типа. Связка высокоточной лазерной локации с многоканальным лазерным поражающим устройством формирует единый информационно-энергетический комплекс, обеспечивающий полный цикл – от обнаружения и сопровождения квадрокоптера до его выведения из строя.

2. Алгоритм оценки амплитуды биений, возникающих на выходе фотоприемного устройства

Полагая, что при решении задачи обнаружения принято решение о наличии полезного сигнала на выходе ФП, произведем оценку амплитуды биений [6–8].

Для получения параметров вибрации, необходимо осуществлять подстройку фазового фронта лазера гетеродина. Оценки амплитуды биений с выхода ФП формируются непрерывно. Из совокупности полученных значений оцениваемого параметра за время подстройки фазового фронта гетеродина, наиболее правдоподобной считается амплитуда, у которой уровень энергии выше. Рассмотрим алгоритм получения оценки амплитуды биений сигнала за один такт.

Пусть в принимаемой смеси

$$x(t) = s(t,A) + n(t),\ 0 \le t \le T, \qquad (10)$$

информационный сигнал описывается следующим выражением

$$s(t,A) = A \cdot S_0(t)\cos[2\pi\Delta f + \varphi], \qquad (11)$$

где $S_0(t)$ – огибающая сигнала единичной амплитуды; φ – случайная фаза; $n(t)$ – белый шум с постоянной спектральной плотностью $F_{\text{п}}(\omega) = N_0/2$; T – интервал наблюдения; $\int_0^T S_0^2(t)dt = E_0$ – энергия единичной огибающей радиосигнала.

Функционал правдоподобия параметра A имеет вид:

$$F(A) = \text{const} \cdot exp\left[-\frac{A^2E_0}{2N_0}\right] \cdot I_0\frac{2AZ}{N_0}, \qquad (12)$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; Z – огибающая корреляционной функции.

$$Z = \sqrt{\left[\int_0^T x(t)\cdot S_0(t)\cdot\cos(\omega_0 t)dt\right] + \left[\int_0^T x(t)\cdot S_0(t)\cdot\sin(\omega_0 t)dt\right]}. \qquad (13)$$

Уравнение правдоподобия

$$\frac{d\ln F}{\hat{A}} = exp\left[-\frac{\hat{A}^2E_0}{2N_0}\right]\cdot\left(\left[-\frac{\hat{A}E_0}{2N_0}\right]\right)\cdot I_0\left(\frac{2AZ}{N_0}\right) + \\ + exp\left[-\frac{\hat{A}^2E_0}{2N_0}\right]\cdot I_0'\left(-\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)\cdot\frac{2Z}{N_0} = 0. \qquad (14)$$

В (14), $I_0'\left(-\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right) = I_1\left(-\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка.

Из (14) определяется оценка амплитуды

$$\hat{A} = \frac{\frac{2Z}{N_0}\cdot I_1\left(\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)}{\frac{E_0}{N_0}\cdot I_1\left(\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)}. \qquad (15)$$

Множитель $I_1(x) / I_0(x)$ нелинейно зависит от x и изменяется от 0 до 1 при изменении x от 0 до ∞. Однако уже при $x \ge 3$ $I_1(x) / I_0(x) \approx 1$, поэтому справедливо равенство

$$\hat{A} = \frac{2Z}{N_0}. \qquad (16)$$

На рисунке 4 в соответствии с (16) приведена структурная схема устройства оптимальной оценки амплитуды сигнала.

Дисперсию оценки амплитуды можно получить из анализа структуры апостериорной вероятности, если воспользоваться асимптотическим разложением модифицированной функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

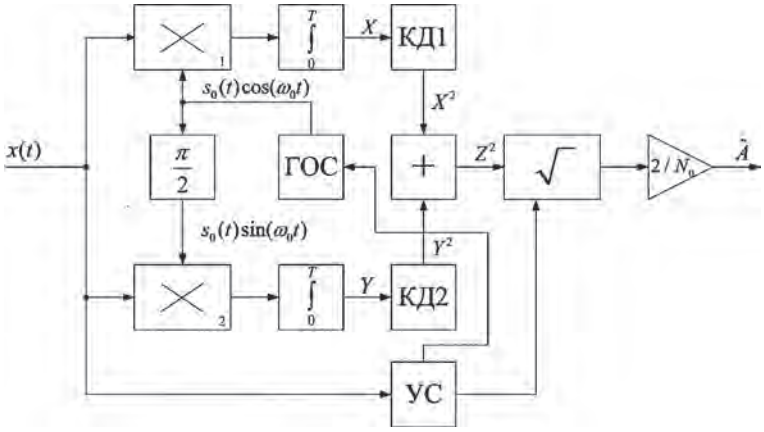

Рис. 4. Структурная схема устройства оптимальной оценки амплитуды

$$P_{PS}(A) = \text{const} \cdot F(\lambda) = \text{const} \cdot exp\left[-\frac{A^2E_0}{2N_0}\right] \cdot I_0\frac{2AZ}{N_0} =$$

$$= \text{const}\,\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{2AZ}{N_0}\right)^{-1/\lambda} e^{-\left(\frac{A^2E_0}{2N_0}-\frac{2AZ}{N_0}\right)} =$$

$$= \text{const}\,\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A}} e^{-\left(\frac{(A-\hat{A})^2}{2\sigma A^2}\right)}, \qquad (17)$$

где дисперсия оценки амплитуды сигнала имеет вид

$$\sigma_A^2 = \frac{N_0}{E_0}. \qquad (18)$$

Таким образом, для формирования оценки амплитуды биений в ФП необходимо осуществлять подстройку фазового фронта гетеродина. Кроме того, из (18) следует, что потенциальная точность оценки амплитуды тем выше, чем больше энергия сигнала относительно шума.

3. Алгоритм оценки частоты биений, возникающих на выходе фотоприемного устройства

Для определения вращения винтов помимо оценки амплитуды биений сигнала на выходе ФП необходимо знание их частоты. Пускай произведено обнаружение сигнала, необходимо произвести оценку частоты биений. Для формирования правдоподобной оценки, необходимо осуществлять подстройку фазового фронта гетеродина [9]. Рассмотрим алгоритм формирования оценки частоты биений сигнала на выходе ФП за один такт.

Пусть сигнал описывается аналитическим выражением вида

$$S(t,\Delta f) = S_0(t) \cdot \cos[2\pi(f_0 - f)t + \varphi],\ 0 \le t \le T, \qquad (19)$$

в принимаемой смеси

$$x(t) = S(t,\Delta f) + n(t), \qquad (20)$$

содержит информацию о смещении частоты Δf. Для этого случая сигнальная функция примет вид:

$$y_c(\Delta f) = \frac{2}{N_0}\int_0^T S_0^2(t) \cdot cos[2\pi(f_0 - \Delta f_0)t + \varphi] \cdot$$

$$cos[2\pi(f - \Delta f)t + \varphi)]dt = \frac{1}{N_0}\int_0^{T\int_0^t tdt.} S_0^2(t) \cdot cos. \qquad (21)$$

Первая и вторая производные (21)

$$y_c'(\Delta f) = \frac{1}{N_0}\int_0^{T\int_0^t tdt} tS_0^2(t) \cdot sin, \qquad (22)$$

$$y_c'(\Delta f) = \frac{1}{N_0}\int_0^{T\int_0^t tdt} t^2S_0^2(t) \cdot cos. \qquad (23)$$

При $\Delta f = \Delta f_0$, где Δf_0 – истинное значение смещения частоты,

$$y_c''(\Delta f) = -\frac{1}{N_0}\int_0^T t^2S_0^2(t)dt =$$

$$= -\frac{2E}{N_0} \cdot \frac{\int_0^T t^2S_0^2(t)dt}{\int_0^T S_0^2(t)dt} = \frac{2E}{N_0} \cdot \alpha^2, \qquad (24)$$

где $\int_0^T S_0^2(t)dt = 2E$, $\alpha^2 = \frac{\int_0^T t^2S_0^2(t)dt}{\int_0^T S_0^2(t)dt}$ имеет размерность круговой частоты в квадрате.

Следовательно, дисперсия оценки смещения действительной частоты примет вид

$$\sigma_f^2 = \frac{\sigma_{\hat{\Omega}}^2}{(2\pi)^2} = \frac{1}{\left(\frac{2E}{N_0}\right) \cdot \alpha^2(2\pi)^2} = \frac{1}{\left(\frac{2E}{N_0}\right)T_{эк}^2}, \qquad (25)$$

где $T_{эк} = 2\pi\alpha$ – эквивалентная длительность сигнала.

Из (25) следует, что потенциальная точность оценки смещения частоты тем выше, чем больше отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума и эквивалентная длительность.

Многоканальный вариант структурной схемы оптимальной оценки частоты представлен на рисунке 5.

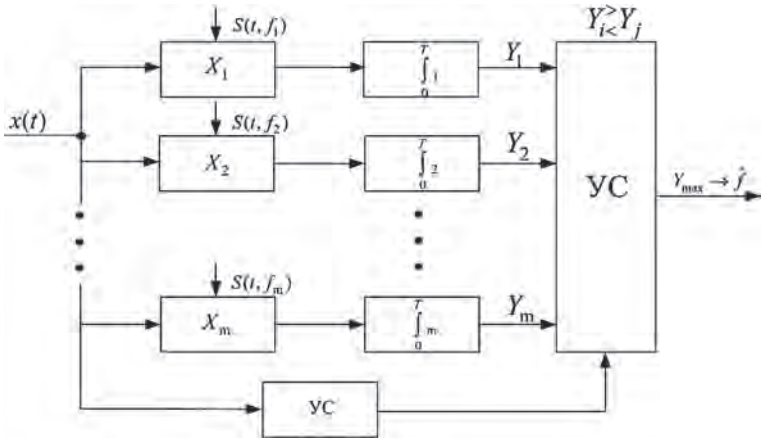

Рис. 5. Многоканальный вариант структурной схемы оптимальной оценки частоты

Основным достоинством данной схемы является быстродействие. Отраженный сигнал распределяется по всем каналам. Каждый канал настроен на свою частоту. С выхода устройства сравнения будет определяться номер канала и значение частоты. Каналы могут настраиваться, используя априорную информацию.

4. Алгоритм оценки амплитуды и частоты биений, возникающих на выходе фотоприемного устройства

Обобщенная структурная схема устройства оценки амплитуды и частоты биений представлена на рисунке 6 [10].

6. Заключение

В результате проведенного исследования разработаны алгоритмы обнаружения и оценивания параметров отражённого сигнала от вращающихся винтов беспилотного летательного аппарата малого класса при зондировании лазерной локационной станцией гетеродинного типа, основанные на методе максимального правдоподобия. В отличие от известных решений, процедура оценивания организована как последовательный процесс формирования совокупности промежуточных оценок амплитуды и частоты биений на всём интервале фазовой подстройки гетеродина и последующим выбором наиболее правдоподобной реализации по критерию максимальной амплитуды, что повышает устойчивость алгоритма к фазовым искажениям и улучшает качество приёма отражённого сигнала.

Получены аналитические выражения и оценки, позволяющие количественно определить их точностные показатели и сформировать обоснованные требования к параметрам фотоприёмного устройства и чувствительности подсистемы лазерной разведки. Показано, что использова-

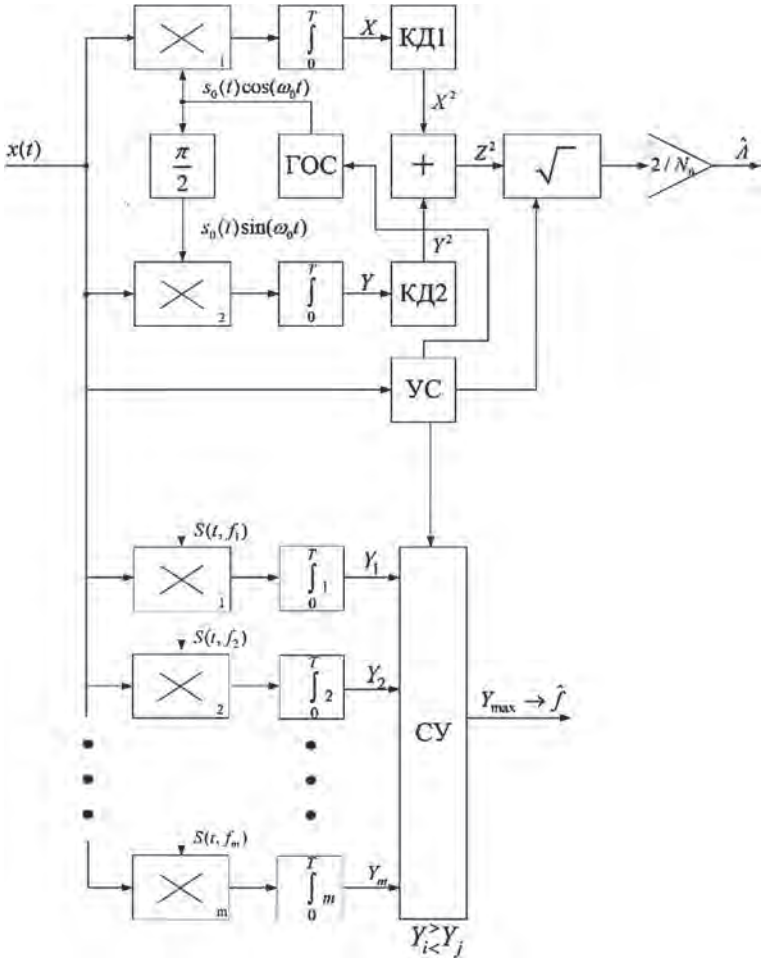

Рис. 6. Обобщенная структурная схема устройства формирования оценок амплитуды и частоты биений

ние оценок частоты биений, обусловленных вращением лопастей, обеспечивает формирование информативных признаков, достаточных для идентификации беспилотных летательных аппаратов малого класса и их различения с объектами иной природы.

Тем самым предложенные алгоритмы обеспечивают получение достоверной информации о наличии и параметрах цели, позволяют классифицировать обнаруженный объект как беспилотный летательный аппарат малого класса на основе оценок частоты и амплитуды отражённого сигнала, на основании чего принимается решение о применении пространственно-распределённой системы направленной энергии.

Литература

1. Козирацкий, А. Ю. Способ пространственного сложения электромагнитных излучений когерентных источников / А. Ю. Козирацкий, А. В. Чёнгин // Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы XXV Международной научно-практической конференции (12–13 февраля 2025 г.) / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2025. – С. 1177–1184.
2. Козирацкий, А. Ю. Методический подход к энергетическому расчету пространственно-распределенной системы сложения мощностей когерентных источников оптического диапазона длин волн / А. Ю. Козирацкий, А. В. Чёнгин, О. В. Смынтына // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции (Воронеж, 15–17 апреля 2025 г.): в 6 т. Т. 3 / Воронежский государственный университе ; АО «Концерн Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. – С. 8–15.
3. Патент № 2791818 C1 Российская Федерация. Способ обнаружения вибрирующих объектов, основанный на анализе интерференционной картины, получаемой с использованием лазерных локационных станций гетеродинного типа: № 2022115824 : заявл. 10.06.2022 : опубл. 07.03.2023, Бюл. № 3 / Д. А. Дрынкин, О. В. Смынтына, А. Г. Петухов; заявитель и патентообладатель Дрынкин Д. А., Смынтына О. В., Петухов А. Г.
4. Дрынкин, Д. А. Предложение по использованию лазерной локационной станции гомодинного типа при селекции вибрирующих объектов / Д. А. Дрынкин, А. Ю. Козирацкий, А. Г. Петухов // Радиолокация, навигация, связь: материалы Международной научно-технической конференции (Воронеж, 2023 г.). – Воронеж: АО «Концерн Созвездие», 2023. – С. 209–216.
5. Козирацкий, А. Ю. Алгоритм работы лазерной локационной станции гомодинного типа при селекции вибрирующих объектов / А. Ю. Козирацкий, О. В. Смынтына // Современное состояние и перспективы развития систем связи и РТО в управлении авиацией. Научные чтения имени А. С. Попова: материалы Международной научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2023. – С. 54–58.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680198 Российская Федерация. Формирование вибрационного портрета: заявл. 24.10.2022: опубл. (зарег.) 28.10.2022 / Д. А. Дрынкин.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685469 Российская Федерация. Программа расчета вибрационных характеристик лоцируемых объектов: заявл. 12.12.2022: опубл. (зарег.) 23.12.2022 / Д. А. Дрынкин.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616090 Российская Федерация. Программа оценки амплитуды биений сигнала на выходе элемента матричного фотоприемного устройства: заявл. 01.03.2024: опубл. (зарег.) 15.03.2024 / Д. А. Дрынкин.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615704 Российская Федерация. Программа оценки частоты биений сигнала на выходе элемента матричного фотоприемного устройства: заявл. 01.03.2024: опубл. (зарег.) 12.03.2024 / Д. А. Дрынкин.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615946 Российская Федерация. Программа синтеза вибрационного изображения на основе оценок амплитуд и частот биений сигналов с элементов матричного фотоприемного устройства: заявл. 01.03.2024: опубл. (зарег.) 14.03.2024 / Д. А. Дрынкин.

ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING DURING AIRCRAFT LASER DETECTION

Koziratsky A. Yu.[4], Chengin A. V.[5], Grevtsev A. I.[6]

Keywords: *laser localization, heterodyne, maximum likelihood, amplitude estimation, frequency estimation, quadrocopter, detection.*

4 ***Alexander Yu. Koziratsky***, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering and Antenna-Feeder Devices, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy. Voronezh, Russia. E-mail: sashfish@bk.ru

5 ***Alexander V. Chengjin***, Postgraduate Student at the Military Educational and Scientific Center of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy. Voronezh, Russia. E-mail: alexsvist168@mail.ru

6 ***Alexander I. Grevtsev***, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Radio Engineering and Antenna and Feeder Devices at the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy. Voronezh, Russia. E-mail: grevtsev.sanche@yandex.ru

Abstract

Objective: *develop algorithms for detecting and estimating the parameters of the reflected signal from the rotating propellers of a small-class unmanned aerial vehicle during probing by a heterodyne-type laser radar station.*

Method: *maximum likelihood method.*

Results: *the algorithms for detecting and estimating the parameters of input signals necessary for the identification of small-class unmanned aerial vehicles in the airspace by the laser reconnaissance subsystem differ from those known by the introduction of an additional procedure for tuning the local oscillator phase front. The process of generating estimates is iterative due to the tuning of the local oscillator phase front. Estimates are formed throughout the phase front adjustment and are stored in a buffer device. The most plausible estimate is the one with a larger amplitude. The algorithms make it possible to obtain initial data from input implementations for the method of generating identification by the laser reconnaissance subsystem of small-class unmanned aerial vehicles by a heterodyne-type laser radar station. The algorithms make it possible to optimally assess the amplitude and frequency of beats at the output of the photodetector, taking into account the tuning of the local oscillator phase front, as well as to determine the statistical characteristics of the estimates obtained, which in turn makes it possible to form requirements for the parameters of the airspace reconnaissance subsystem based on the use of a heterodyne-type laser radar station.*

Scientific novelty: *algorithms for detecting and estimating the parameters of the signal reflected from rotating propellers when sounding a small-class unmanned aerial vehicle with a heterodyne-type laser radar station have been developed.*

References

1. Koziratsky, A. Yu., & Chengin, A. V. (2025). Method of spatial summation of electromagnetic radiation from coherent sources. In Informatika: problemy, metody, tekhnologii: Proceedings of the 25th International Scientific and Practical Conference (pp. 1177–1184). Voronezh: Publishing and Printing Center of Voronezh State University.
2. Koziratsky, A. Yu., Chengin, A. V., & Smyntyna, O. V. (2025). Methodological approach to the energy calculation of a spatially distributed power combining system for coherent optical-range sources. In Radiolocation, Navigation, Communication: Proceedings of the 31st International Scientific and Technical Conference (Vol. 3, pp. 8–15). Voronezh: VSU Publishing House.
3. Drynkin, D. A., Smyntyna, O. V., & Petukhov, A. G. (2023). Patent No. 2791818 C1 Russian Federation: Method for detecting vibrating objects based on the analysis of the interference pattern obtained using heterodyne laser location stations. Application No. 2022115824; filed June 10, 2022; published March 7, 2023, Bulletin No. 3.
4. Drynkin, D. A., Koziratsky, A. Yu., & Petukhov, A. G. (2023). Proposal for the use of a homodyne laser location station for the selection of vibrating objects. In Radiolocation, Navigation, Communication: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Pp. 209–216). Voronezh: Concern Sozvezdie.
5. Koziratsky, A. Yu., & Smyntyna, O. V. (2023). Algorithm of operation of a homodyne laser location station for the selection of vibrating objects. In Current State and Prospects for the Development of Communication Systems and Radio-Technical Equipment in Aviation Control: Proceedings of the A. S. Popov Scientific Readings (Pp. 54–58). Voronezh: Military Training and Research Center of the Air Force «VVA».
6. Drynkin, D. A. (2022). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022680198 Russian Federation: Formation of a vibration portrait. Application filed October 24, 2022; registered October 28, 2022.
7. Drynkin, D. A. (2022). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022685469 Russian Federation: Program for calculating vibration characteristics of located objects. Application filed December 12, 2022; registered December 23, 2022.
8. Drynkin, D. A. (2024). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2024616090 Russian Federation: Program for estimating the beat amplitude of the signal at the output of the matrix photodetector element. Application filed March 1, 2024; registered March 15, 2024.
9. Drynkin, D. A. (2024). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2024615704 Russian Federation: Program for estimating the beat frequency of the signal at the output of the matrix photodetector element. Application filed March 1, 2024; registered March 12, 2024.
10. Drynkin, D. A. (2024). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2024615946 Russian Federation: Program for synthesizing a vibration image based on estimates of amplitudes and frequencies of beat signals from matrix photodetector elements. Application filed March 1, 2024; registered March 14, 2024.