УДК 681.5:621.38

Герасимов Владимир Павлович, Даржания Александр Юрьевич, Ковалёв Владимир Данилович

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОМЕРНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО КОРРЕЛЯТОРА

В статье рассматривается математическое моделирование алгоритма вычисления рассогласования между текущим и требуемым положениями линии визирования по одной из осей бортового контроллера видеовизира беспилотного летательного аппарата (БПЛА), позволяющее в автоматическом режиме повысить надёжность и точность обнаружения и сопровождения очага возгорания в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: *алгоритм, контроллер, видеовизир, коррелятор, пеленгационная характеристика, линия визирования, рассогласование.*

Vladimir Gerasimov, Alexander Darzhanya, Vladimir Kovalev

CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL FOR ONE-DIMENSIONAL DIFFERENTIAL CORRELATOR

The article deals with mathematical modeling of the algorithm for calculating the error between the current and desired position of the vision line along one of the axes of the on-board controller in the videovisira of unmanned aerial vehicle (UAV), which allows an automatic increase in the reliability and accuracy of fire detecting and tracking in emergencies.

Key words: *algorithm, controller videovisir, correlator, DF feature, vision line, misalignment.*

В связи с изменением климата на Земле всё большую актуальность приобретает борьба с лесными пожарами. Огненное бедствие угрожает не только лесным ресурсам, но и населённым пунктам, а в последнее время потери усугублялись и человеческими жертвами, что вызывает необходимость принятия безотлагательных мер по предотвращению потерь от лесных пожаров.

Повысить эффективность работы МЧС в этом направлении может применение как пилотируемой, так и беспилотной авиации, причём для последней важной является разработка надёжных алгоритмов, решающих задачи автоматического обнаружения и сопровождения огненных очагов с требуемой точностью. Для бортовых контроллеров, реализующих указанные алгоритмы, важно и снижение требований к ресурсам компьютера.

Минимизировать эти требования можно, применяя быстродействующие методы обработки видеоинформации, к которым, например, относится корреляционный дифференциальный метод, являющийся беспоисковым и требующий для определения рассогласования вычисления только двух значений корреляционной функции [1]. При этом определяются:

- знак разностной функции $\Delta K(\tau) = K(\tau - \Delta\tau) - K(\tau + \Delta\tau)$, необходимый для определения направления рассогласования между эталонным и текущим сигналами;
- модуль $|\Delta K(\tau)|$, по которому оценивается величина рассогласования.

Если реальную корреляционную функцию проаппроксимировать стандартными функциями, то можно аналитически формализовать пеленгационную (дискриминационную) характеристику $D(\tau)$ для последующего получения значения аргумента (получения рассогласования) вычислением обратной функции $\tau = D^{-1}(\tau)$.

Известно, что корреляционная функция подстилающих изображений, получаемых бортовыми телевизионными визирами, носит экспоненциальный характер [2].

При определении особенностей пеленгационных характеристик одномерного дифференциального коррелятора с экспоненциальной корреляционной функцией проанализируем пеленгационную характеристику $D(\alpha, z_j, \Delta z)$ с параметрами:

- постоянная экспоненты $\alpha = 1$ (в дальнейшем полученные результаты можно будет сравнивать с решениями, полученными при $\alpha < 1$ или $\alpha > 1$);
- рассогласование (аргумент) $z \in \{-3,\ \ldots,\ 3\}$, так как $D(1,\ z \geq 3,\ 0) \leq 0{,}05$, что с 5 %-ной погрешностью можно считать нулевым значением и поведение экспоненциальной функции за указанными пределами для изучаемой проблемы интереса не представляет;
- отсчеты $j \in \{0\ \ldots\ L\}$, где L – максимальный номер отсчета;
- фиксированный сдвиг $\Delta z = 1{,}5 \cdot a^{-1}$ (в этом случае апертура пеленгационной характеристики на отрезке $[-\Delta z\ \ldots\ \Delta z]$ равна $2\Delta z = 3\alpha^{-1}$).

Алгоритм построения пеленгационной характеристики одномерного дифференциального коррелятора с экспоненциальной корреляционной функцией в кодировке математического пакета MathCad представлен в таблице операциями 1 … 8.

Результаты математического моделирования сводятся в двумерные матрицы N (первичные вычисления) и p (нормированная матрица N) размером $4 \times (L+1)$, а затем по значениям строк матрицы p MathCad строит графики (см. рис.).

Таблица

Алгоритм расчета пеленгационной характеристики

№	Выполняемые операции	Комментарий
1	$K(\alpha, z) := e^{-\alpha \cdot \lvert z \rvert}$	Математическое описание корреляционной функции
2	$\alpha := 1 \quad \Delta z := \frac{1{,}5}{\alpha} \quad L := 20$	Задание значений параметров α, Δz и количества отсчетов L
3	$j := 0 \ldots L \quad z_j := \frac{j - 0{,}5 \cdot L}{10}$	Формирование цикла с параметром j и вычисление j-х значений аргумента z
4	$N_{0,j} := K(\alpha, z_j + \Delta z)$	Вычисление значений корреляционной функции, смещенной на $+\Delta z$
5	$N_{1,j} := K(\alpha, z_j - \Delta z)$	Вычисление значений корреляционной функции, смещенной на $-\Delta z$
6	$N_{2,j} := N_{1,j} - N_{0,j}$	Вычисление значений пеленгационной характеристики $D(1;\ z_j;\ 1{,}5)$
7	$N_{3,j} := \left\lvert \begin{array}{l} \frac{1}{\Delta z} z_j \ if\ z_j \leq \Delta z \\ sign(z_j)1\ \ otherwise \end{array} \right.$	Расчет идеальной пеленгационной характеристики
8	$N_{max} := \max(N) \quad p := \frac{N}{N_{max}}$	Нормирование корреляционных функций и пеленгационных характеристик

Анализ полученных результатов и сравнение пеленгационной характеристики $p_{2,j}$, сформированной разностью смещенных на $\pm\Delta z$ корреляционных функций – $p_{0,j}$ и $p_{1,j}$, с идеальной – $p_{3,j}$ (рис., графики 3, 1, 2 и 4, соответственно) приводит к следующим выводам:

- рабочий участок $z \in [-1{,}5\ \ldots\ 1{,}5]$ пеленгационной характеристики нелинеен;
- экстремальные значения характеристики (при $\lvert z_j \rvert = 1{,}5$) требуют нормирования.

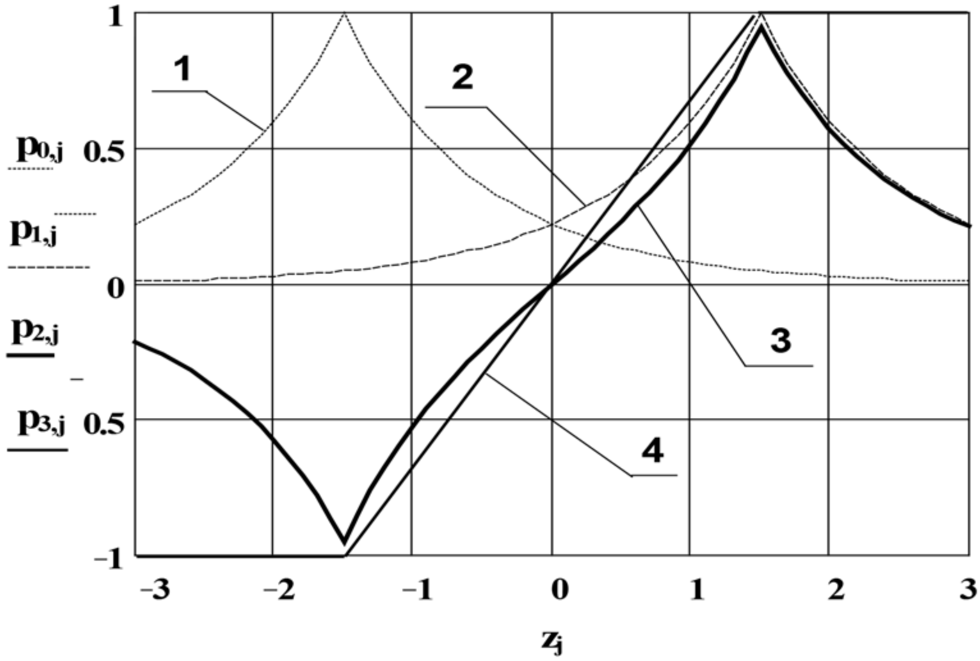

Рис. Формирование пеленгационной характеристики одномерного дифференциального коррелятора

Следовательно, для построения коррелятора, толерантного к изменению условий применения, выражающихся в изменении параметра α, представляют интерес следующие проблемы:

- формализация рабочего участка пеленгационной характеристики;
- выяснение влияния параметров α и Δ на точность определения рассогласования коррелятором;
- минимизация ошибки вычисления рассогласования оптимизацией соотношения параметров α и Δ.

Для продолжения исследований линеаризуем полученную пеленгационную характеристику в математической модели одномерного коррелятора.

При исследовании погрешностей в вычислении рассогласования коррелятора, вызванного отличием линеаризованной пеленгационной характеристики дифференциального коррелятора от реальной, в математической модели применялась подстановка эталонов $F(t \pm \Delta)$ и текущего сигнала $F(t-\tau)$, определялись значения автокорреляционной функции $K(\tau)$, $K(t\pm\Delta)$ и, в конечном результате, разностной (дифференциальной) функции $\Delta K(\tau)$. Математическое представление последней описывается эмпирической зависимостью (в предыдущей экспоненциальной модели) $D(\tau)$, а соответствие $\Delta K(\tau)$ и $D(\tau)$ проверяется графически и аналитически:

$$\delta(\tau) = \left| D(\tau) - \Delta K(\tau) \right|.$$

Далее, для анализа влияния на формирование пеленгационных характеристик соотношения параметров отслеживаемого сигнала и настроек дискриминатора при исследовании одномерных дифференциальных корреляторов рационально выбрать простейший сигнал – меандр с амплитудой B_0 и длительностью T, начинающийся в момент времени t_0. Меандр $B(t)$ и его корреляционная функция $K(\tau)$ описываются выражениями:

$$B(t) = \begin{cases} \forall t \in \{t_0 \le t \le t_0 + T\} \Rightarrow B_0 \\ \forall t \in \{t < t_0 \Lambda t > t_0 + T\} \Rightarrow 0 \end{cases} \tag{1}$$

$$K(\tau)=\begin{cases}\forall\,\tau\in\{|\tau|\le T\}\Rightarrow B_0(T-|\tau|),\\ \forall\,\tau\in\{|\tau|>T\}\Rightarrow 0\end{cases}\qquad(2)$$

Функция $K(\tau)$ в данном случае представляет собой равнобедренный треугольник с амплитудой B_0T и основанием $2T$ (2). Так как параметры B_0 и T измеряемы, то $K(\tau)$ и, следовательно, можно вычислить $\tau = K^{-1}(\tau)$. В соответствии с выражениями (1 и 2) после подстановки $\tau \pm \Delta$ в $\Delta K(\tau)$, при условии, что $\Delta = \mathrm{T}$, формируется пеленгационная характеристика $D(\tau)$ – в общем случае кусочно-линейная [2], но с прямолинейным рабочим участком на отрезке [–Т…Т]:

$$D(\tau)=\begin{cases}a\cdot\tau, & \text{если } |\tau|<T;\\ -a\cdot\tau+sign(\tau)\cdot b\cdot T, & \text{если } T\le|\tau|\le 2T;\\ 0, & \text{если } 2T\le|\tau|,\end{cases}\qquad(3)$$

где $a = B_0T / \mathrm{T} = B_0$, $b = 2\cdot B_0$.

Величина рассогласования из (3) в пределах апертуры вычисляется следующим образом:

$$\tau = D^{-1}(\tau) = 1/\,B_0\cdot D(\tau) \qquad (\text{при условии } |D(\tau)| \le B_0T).\qquad(4)$$

Требования к обеспечению бессрывности сопровождения объекта слежения в различных условиях вынуждают рассматривать все возможные варианты соотношений Δ и T в одномерном дифференциальном корреляторе с треугольной корреляционной функцией (3), принятой в качестве базовой при построении пеленгационных характеристик. Математический анализ приводит к выводу о наличии трех типовых вариантов характеристик, определяемых отношением фиксированного сдвига Δ к длительности эталонного меандра Т:

1) $\Delta \le 0{,}5\cdot\mathrm{T}$;
2) $0{,}5\cdot\mathrm{T} < \Delta \le \mathrm{T}$;
3) $\mathrm{T} < \Delta$;

и семи диапазонов пеленгационных характеристик, ограничиваемых точками $-g_j$ и g_j (индекс $j\in\{0\ \dots\ 2\}$), в которых происходят изломы прямых линий.

Алгоритм математической модели можно реализовать в имитационной модели, чтобы графически интерпретировать результаты математического анализа. Если получаемые численным (компьютерным) моделированием значения пеленгационных характеристик (ПЗ) вывести для графического анализа совместно с результатами, вычисляемыми реализацией аналитических выражений (1–4), то анализ ПХ можно упростить. Данную процедуру необходимо провести для каждого из трех вариантов.

Очевидно, что в качестве рабочего участка пеленгационной характеристики следует выбирать центральный участок, размеры которого будут определять ее апертуру.

Если указанные особенности пеленгационных характеристик не учитываются алгоритмом дифференциального коррелятора, то несовпадения параметров обрабатываемых сигналов с гипотетическими приведут к погрешностям вычисления рассогласования, вычисляемым по формуле

$$\delta(X) = X - d(X).\qquad(5)$$

Анализ погрешностей $\delta(X)$ дискриминаторов с фиксированным сдвигом Δ, равным длительности меандра T, позволит выявить особенности одномерных дифференциальных корреляторов, настроенных на обработку сигналов с треугольной (линеаризованной) корреляционной функцией.

Но бортовой коррелятор является двумерным измерителем, поэтому требуется изучение пеленгационных характеристик как функций двух аргументов X и Y.

Бессрывное сопровождение объектов слежения можно обеспечить минимизацией погрешности $\delta(X)$, а в двумерной постановке задачи – $\delta(X, Y)$.

Результаты математического моделирования, приведенные в статье, могут быть использованы в различных прикладных задачах, например, при обработке информации в интересах:

– поддержки инновационности аграрно-промышленного комплекса (АПК) [3],
– борьбы с чрезвычайными ситуациями [4],
– повышения качества учебного процесса [5].

Литература

1. Герасимов В. П., Даржания А. Ю., Ковалёв В. Д. Особенности обработки видеоинформации в дифференциальном корреляторе БПЛА // Вестник СКФУ. 2014. № 4 (43). С. 28–33.
2. Барсуков Ф. И., Величкин А. И. Телевизионные системы летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1979.
3. Трошков А. М. Теоретическая модель определения направления полёта пчёлами для мониторинга медоносности сельскохозяйственных культур и управления процессом передачи информации в пчелосемью / В. П. Герасимов, В. И. Сапожников, О. Н. Кусакина // Вестник АПК Ставрополья. 2014. № 3 (15). С. 45–51.
4. Герасимов В. П., Ковалёв В. Д., Закревский А. Б. Информационные технологии в борьбе с пожарами с помощью беспилотных летательных аппаратов // Информационные системы и технологии как фактор развития экономики региона: сб. материалов II Международной НПК. Ставрополь: Агрус, 2013, С. 21–25.
5. Сапожников В. И. Адаптивная траектория обучения в электронных изданиях // Сб. материалов IV Международной НПК «Моделирование производственных процессов и развитие информационных систем». Ставрополь: Бюро Новостей. СтГАУ, 2012. С. 292–293.

УДК 551

Дроздов Владислав Владиславович, Гнедковская Татьяна Владимировна, Волошина Татьяна Владимировна, Сторчак Екатерина Викторовна

МЕТОДИКА ПЕРЕСЧЕТА МОЩНОСТИ ОТЛОЖЕНИЙ В СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

В статье рассматривается формирование геологической структуры Центрального Предкавказья в альпийском геотектоническом цикле и дается количественная оценка режима колебательных движений.

Ключевые слова: *геологические структуры, колебательные движения, геотектоника, осадконакопление, геологические этапы.*

Vladislav Drozdov, Tatyana Gnedovskaya, Tatyana Voloshina, Ekaterina Storchak

METHODOLOGY FOR TRANSLATING THICKNESS OF DEPOSITS INTO SEDIMENTATION RATE

The article deals with the formation of the geological structure in the central Caucasus in the Alpine geotectonic cycle, and offers a quantitative evaluation of the vibration movement mode.

Key words: *geological structures fluctuating motion, geotectonics, sedimentation, geological stages.*

Для всесторонней оценки режима вертикальных движений в работе была использована методика пересчета мощности отложений в скорости осадконакопления, предложенная В. Н. Шолпо [1]. В условиях примерной компенсации прогибаний накоплением осадков, скорость осадконакопления может быть отождествлена со скоростью прогибания [1]. Уплотнение пород в данном случае не учитывалось, т. к. в задачу не ставилось получение истинной физической скорости прогибания. Такие пересчеты делались для возможности сопоставлять в сравнимых величинах развитие исследуемого региона в различные геологические этапы. По полученным материалам автором были построены графики скоростей прогибания основных тектонических элементов Центрального Предкавказья (рис. 1).