

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.391.24
DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-79-87

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕТОДА
ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Н.С. АКИНШИН¹, Ю.И. МАМОН¹, Е.А. СТАРОЖУК²

¹*Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, г. Тула, Россия*

²*Московский государственный технический университет им. Баумана, г. Москва, Россия*

Одним из классических методов повышения помехоустойчивости пассивных средств обнаружения инфракрасного диапазона длин волн (ИКСО) является дифференциальное включение пиродатчиков, разнесённых на некоторое расстояние. Представлена аналитическая модель дифференциального метода приема инфракрасного излучения от движущихся объектов. Проведено сравнение с экспериментальными результатами для подвижных объектов различного типа. Дифференциальное включение датчиков можно использовать не только для компенсации внешних помех, но и для определения границ временного «окна», внутри которого с большой вероятностью может находиться обнаруживаемый подвижный объект. Найденные временные границы используются для принятия решения о типе и параметрах подвижного объекта в комплексированном устройстве классификации объектов.

Установлен принцип работы ИКСО, который заключается в записи сигналов с разнесенных пиродатчиков в соответствующие регистры памяти и обнаружение выбросов огибающей разностного сигнала. Далее из регистров памяти выбираются участки записи сигналов разнесенных пиродатчиков, которые обрабатываются с целью определения временных положений минимум миниморо и максимум максиморо. Направления перемещения объекта относительно траверса определяются по запаздыванию или опережению экстремумов сигналов одного датчика относительно другого внутри данного временного «окна».

Показано, что комплексирование должно быть следующим: активным и базовым должно являться средство с максимальным радиусом зоны чувствительности, но которое при наличии более достоверной информации об обнаруживаемом объекте может осуществить и более «тонкую» классификацию объекта (например, человек – группа людей, колесная техника – гусеничная техника и т. д.). Сделан вывод о преимуществах дифференциального варианта включения разнесенных датчиков.

Результаты могут быть использованы при разработке пассивных средств обнаружения инфракрасного диапазона длин волн на этапе эскизного проектирования.

Ключевые слова: помехоустойчивость, инфракрасный диапазон, корреляционная функция, модель, подвижный объект.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из классических методов повышения помехоустойчивости пассивных средств обнаружения инфракрасного диапазона длин волн (ИКСО) является дифференциальное включение пиродатчиков, разнесённых на некоторое расстояние [1–3]. При этом с двух идентичных по чувствительности и одинаково ориентированных в пространстве пиродатчиков снимаются сигналы и формируется разностный сигнал. Основу алгоритма обнаружения подвижного объекта (ПО) составляют операции вычисления интервальных средних и среднеквадратические оценки (СКО) для разностного сигнала и сравнения с порогом отношения разности соседних средних к СКО.

Однако в научно-технической литературе, посвященной этой тематике, отсутствует аналитическое описание особенностей дифференциальной обработки сигналов ИКСО, связанных как с параметрами ПО, так и с параметрами ИКСО. Содержанием данной статьи является попытка простейшими средствами смоделировать указанный процесс.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Чувствительный элемент ИКСО представляет собой два пироприемника прямоугольной формы размером $l \times h$, расстояние между которыми равно δ . Тогда на расстоянии S м от

ИКСО несложно вывести соотношение для определения геометрических размеров зон чувствительности и расстояния между ними, соответствующих размерам площадок пироприемников [4–6]:

$$L = S \cdot l / f, H = S \cdot h / f, \Delta = S \cdot \delta / f. \quad (1)$$

Здесь L и H – линейные размеры зон чувствительности двухплощадочного пироприемника на расстоянии S от него; Δ – расстояние между этими зонами; f – расстояние от изображения до вогнутого зеркала ИКСО.

Пусть линейный размер ПО равен d , а его скорость движения перпендикулярна линии визирования и равна v , тогда промежуток времени, за который ПО либо полностью входит в зону чувствительности, либо полностью ее перекрывает, будет равен

$$\tau_1 = \begin{cases} d / v, & d \leq L, \\ L / v, & d > L. \end{cases} \quad (2)$$

Промежуток времени, когда либо ПО продолжает находиться внутри зоны чувствительности, либо продолжает ее полностью перекрывать, можно определить следующим образом:

$$\tau_2 = \begin{cases} (L - d) / v, & d \leq L, \\ (d - L) / v, & d > L. \end{cases} \quad (3)$$

Промежуток времени, за который ПО полностью выходит из зоны чувствительности, будет также равен τ_1 . Время задержки сигналов, поступающих с пироприемников на схему обработки, будет равно

$$\tau_3 = \Delta / v. \quad (4)$$

Таким образом, промежуток времени, когда линейные размеры ПО и линейные размеры зоны чувствительности могут перекрываться, будет равен

$$\tau_0 = 2\tau_1 + \tau_2. \quad (5)$$

Учитывая, что линейные размеры ПО могут быть как меньше, так и больше линейных размеров зоны чувствительности, введем коэффициент перекрытия в виде

$$g = \begin{cases} d / L, & d \leq L, \\ 1, & d > L. \end{cases} \quad (6)$$

Обозначим при полном перекрытии линейных размеров ПО и зоны чувствительности амплитуду сигнала в любом из пироприемников A . Тогда при неполном их перекрытии можно сказать, что амплитуда сигналов должна быть равна $g \cdot A$. При этом полагаем, что форма сигналов колоколообразная (гауссов сигнал) в отличие от [2], где сигналы на входе схемы обработки ИКСО имеют либо треугольную, либо трапециевидную формы в зависимости от дальности до ПО. Следовательно, сигналы на входе схемы обработки имеют вид [4]

$$s_1(t) = \begin{cases} Age \frac{2}{\tau_0^2} (t-t_0)^2, & t < t_0, \\ Ag, & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_1 + \tau_2, \\ ge \frac{2}{\tau_0^2} (t-t_0-\tau_1-\tau_2)^2, & t > t_0 + \tau_1 + \tau_2, \end{cases} \quad s_2(t) = \begin{cases} Age \frac{2}{\tau_0^2} (t-t_0-\tau_3)^2, & t < t_0, \\ Ag, & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_1 + \tau_2, \\ Age \frac{2}{\tau_0^2} (t-t_0-\tau_1-\tau_2-\tau_3)^2, & t > t_0 + \tau_1 + \tau_2. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь t_0 – задержка во времени максимума сигнала, связанная с размерами зон чувствительности ИКСО и скоростью передвижения ПО.

На рис. 1 для $l = 0,001$ м, $\delta = 0,0008$ м, $f = 0,043$ м, $S = 20$ м и $v = 0,85$ м/с (3 км/ч) в предположении $d \approx 0,4$ м (человек передвигается прогулочным шагом) представлены эти сигналы.

На рис. 2 показана упрощенная блок-схема обработки сигналов с выходов пиродатчиков ИКСО.

На рис. 2: 1, 2 – левый и правый пиродатчики; 3, 4 – полосовые фильтры ($f_n = 0,5$ Гц, $f_b = 8$ Гц); 5, 6 – усилители мощности; 7, 8 – цифровые сглаживающие фильтры ($N = 7$); 9 – устройство вычитания; 10 – пороговое устройство; 11 – решающее устройство.

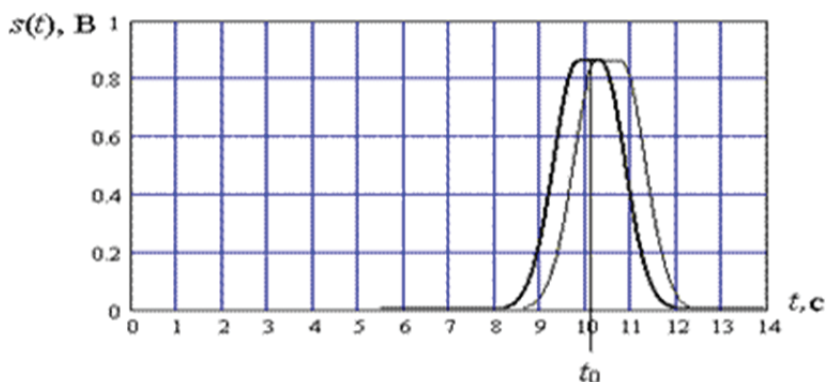


Рис. 1. Сигналы на выходе левого и правого пиродатчиков ИКСО (жирной линией изображен сигнал $s_1(t)$, тонкой линией – сигнал $s_2(t)$)

Fig. 1. Signals at the exit of the left and right IKSO pyrocatechol (the thick line represented a signal of $s_1(t)$, by the thin line does a signal of $s_2(t)$)

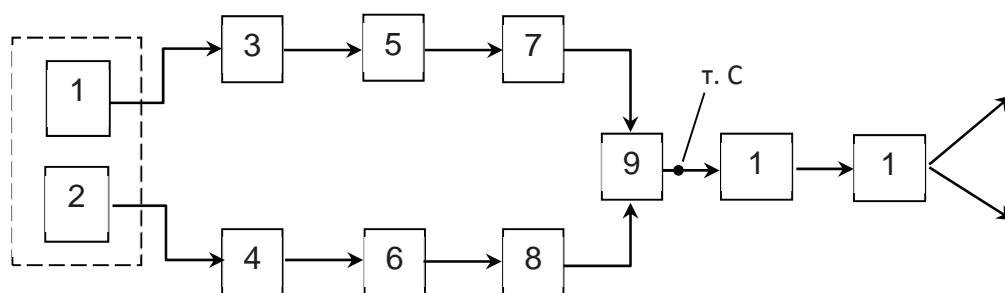


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сигналов у ИКСО с дифференциальным включением пиродатчиков
Fig. 2. Flow diagram of signals processing algorithms at IKSO with differential turning on pyrocatechol

На блок-схеме, изображенной на рис. 2, не представлены блоки, отвечающие за оценку и усреднение текущего помехового фона, блоки и узлы синхронизации и стыковки с другими устройствами, так как в данном случае это не имеет принципиального значения. В данной работе будет использован усредненный помеховый фон, схожий с реальным. При этом усилитель мощности будет вносить флуктуационный (белый) шум с малым значением спектральной плотности мощности в каждом канале. Нас будет интересовать разностный сигнал в точке С.

Чтобы найти этот сигнал, необходимо вычислить корреляционные функции $R_1(t)$ и $R_2(t)$ на выходе полосовых фильтров 3 и 4 и тогда взять их разность. Согласно [5–8]:

$$R_1(t) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-f_2}^{-f_1} W(f) e^{j2\pi f(t-t_0-\tau_s)} df + \int_{-f_2}^{-f_1} W(f) e^{j2\pi f(t-t_0-\tau_s)} df \right], \quad (8)$$

$$R_2(t) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-f_2}^{-f_1} W(f) e^{j2\pi f(t-t_0)} df + \int_{-f_2}^{-f_1} W(f) e^{j2\pi f(t-t_0)} df \right]. \quad (9)$$

Здесь $W(f)$ – преобразование Фурье симметризованных сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$:

$$W(f) = Ag\sqrt{\pi/2} \cdot \tau_0 \cdot e^{-0.5\pi^2 f^2 \tau_0^2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(j \frac{1}{\sqrt{2}} \pi f \tau_0 - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\tau_2}{\tau_0} \right) \right] + Ag\tau_2 \frac{\sin(\pi f \tau_2)}{\pi f \tau_2} + \\ + Ag\sqrt{\pi/2} \cdot \tau_0 \cdot e^{-0.5\pi^2 f^2 \tau_0^2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(j \frac{1}{\sqrt{2}} \pi f \tau_0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\tau_2}{\tau_0} \right) \right]. \quad (10)$$

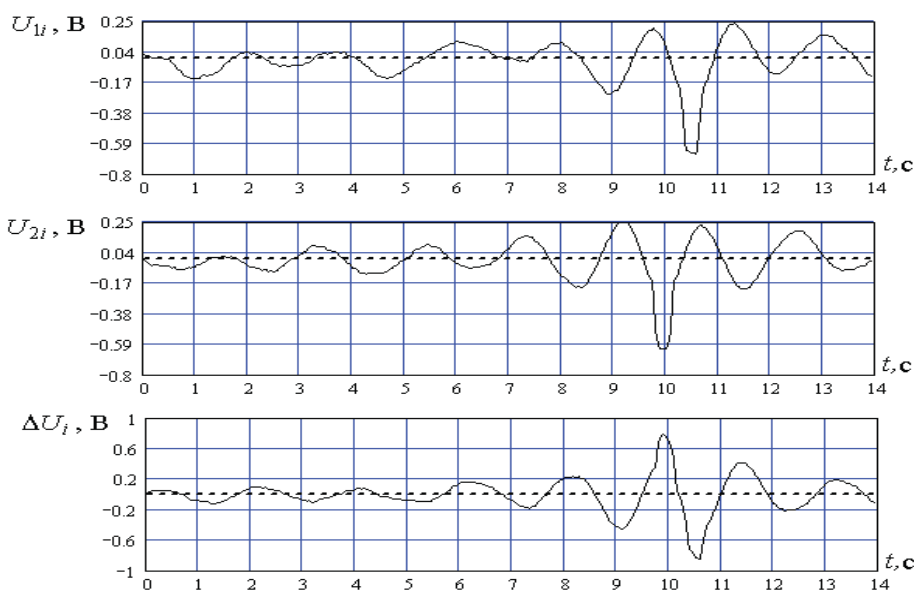


Рис. 3. Обработанные каналные и разностный сигналы от человека, идущего со скоростью 3 км/ч на расстоянии 20 м от ИКСО по траверзу. Направление движения – слева направо
Fig. 3. Processed channel and differential signals from the person going with a speed of 3 km/h at distance of 20 m from IKSO abeam. The direction of the movement is from left to right

Полагаем коэффициент усиления $B = 10$, $A = 1$ В, дисперсию белого шума $n(t)$ около 0,001 Вт. Тогда дискретизации подвергаются сигналы

$$R'_{1i} = -B \cdot R_1(t_i) + s_{1\phi}(t_i) + n_1(t_i), \quad R'_{2i} = -B \cdot R_2(t_i) + s_{2\phi}(t_i) + n_2(t_i). \quad (11)$$

Алгоритм сглаживания усредняющими цифровыми фильтрами имеет вид [4]

$$U_{1i} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^K R'_{1(i-m)}, \quad U_{2i} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^K R'_{2(i-m)}. \quad (12)$$

Разностный сигнал в точке С блок-схемы обработки будет равен

$$\Delta U_i = U_{1i} - U_{2i}. \quad (13)$$

На рис. 3 и 4 представлены зависимости (12) и (13) для одиночного человека при различных скоростях движения v для траверзного расстояния $d = 20$ м.

На рис. 5 представлены зависимости (12) и (13) для одиночного автомобиля типа УАЗ ($d \approx 4,5$ м) при скорости движения $v = 40$ км/ч для траверзного расстояния $S = 40$ м. Из анализа рисунков с экспериментальными данными следует, что больший по величине выброс огибающей разностного сигнала относительно нулевого уровня может быть как положительным, так и отрицательным. Следовательно, для обнаружения подвижного объекта в зоне чувствительности средства обнаружения необходимо выставлять у него два адаптивных порога. Поэтому при относительно малом шумовом фоне и сильных сигналах от объекта обнаружения могут быть одновременно превышены оба порога, что приведет к неопределенности решения о направлении перемещения объекта [9].

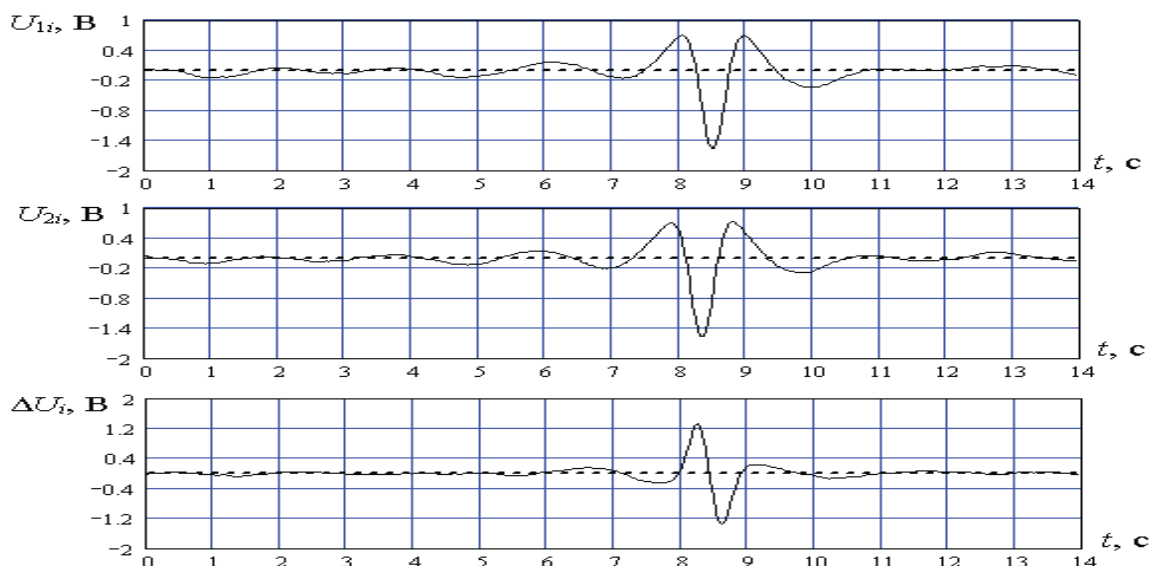


Рис. 4. Обработанные каналные и разностный сигналы от человека, идущего со скоростью 10 км/ч на расстоянии 20 м от ИКСО по траверзу. Направление движения – слева направо

Fig. 4. Processed channel and differential signals from the person going with a speed of 10 km/h at distance of 20 m from IKSO abeam. The direction of the movement is from left to right

Чтобы исключить подобные ситуации, а также обеспечить базовому средству, с которым может быть комплексировано ИКСО, повышенную вероятность нахождения обнаруживаемого объекта, на конкретном временном интервале, для осуществления более подробной классификации обнаруживаемого объекта, комплексирование должно быть следующим – активным и базовым должно являться средство с максимальным радиусом зоны чувствительности, но которое при наличии более достоверной информации об обнаруживаемом объекте может осуществить и более «тонкую» классификацию объекта (например, человек – группа людей, колесная техника – гусеничная техника и т. д.).

Однако при входе подвижного объекта в зону чувствительности базового средства оно сразу не осуществляет обработку сигналов с целью формирования решения, а только включает ИКСО и записывает сигналы от объекта в регистр памяти [9–12]. При входе подвижного объекта в зону чувствительности ИКСО осуществляется запись сигналов с разнесенных пиродатчиков в соответствующие регистры памяти и обнаружение выбросов огибающей разностного сигнала над порогами $\pm 3\sigma_{\phi}$, регистрируются временные границы, в которых произошло обнаруже-

ние выбросов. Далее из регистров памяти выбираются участки записи сигналов разнесенных пиродатчиков, соответствующие выделенным временным границам, и эти записи обрабатываются с целью определения временных положений минимум миниморо и максимум максиморо. Запаздывание или опережение экстремумов сигналов одного датчика относительно другого внутри данного временного «окна» дает однозначное определение направления перемещения объекта относительно траверза.

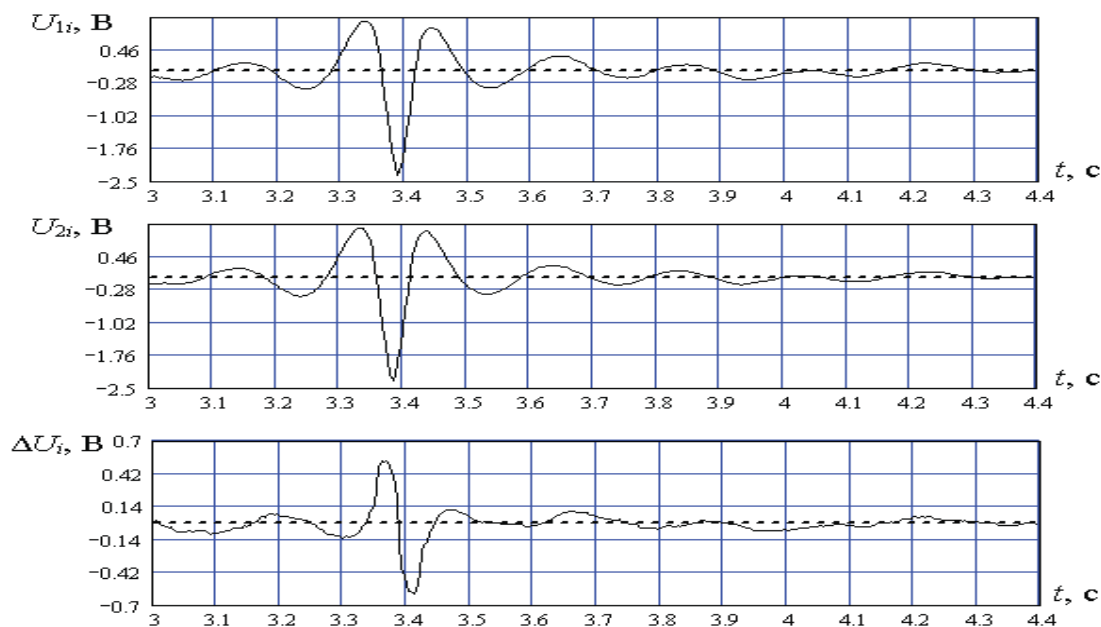


Рис. 5. Обработанные каналные и разностный сигналы от автомобиля типа УАЗ, движущегося со скоростью 40 км/ч на расстоянии 40 м от ИКСО по траверзу.

Направление движения – слева направо

Fig. 5. Processed channel and differential signals from the UAZ car moving at a speed of 40 km/h in the distance of 40 m from IKSO abeam. Driving direction is from left to right

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На конечной стадии работы алгоритма решения базового средства и ИКСО объединяются. При этом базовое средство выделяет из памяти регистра тот участок записи сигналов, который соответствует границам обнаружения объекта ИКСО, так как он должен характеризоваться максимальной информативностью в силу большого отношения сигнал/шум и большой вероятностью присутствия обнаруживаемого объекта именно в этом временном «окне». Далее осуществляется обработка сигнала в этом «окне» и выносится комплексное решение о типе объекта и параметрах его движения.

Преимущества дифференциального варианта включения разнесенных датчиков известны [13–15], это: компенсация удалённых помех естественного или искусственного происхождения; при выбранной базе полезный сигнал суммируется (удваивается); по форме сигнала возможно определение направления движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. М.: Советское радио. 1978. С. 400.
2. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации. Основы теории и принципы построения. М.: Горячая линия-Телеком, 2004.
3. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М.: Мир, 1979.

4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. М.: Радио и связь, 1986. 511 с.
5. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1985.
6. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учебн. пособие. М.: Логос, 2007. 248 с.
7. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». М.: Логос, 2004. 444 с.
8. Оружие и технологии России: Энциклопедия. XXI век / под ред. С.Б. Иванова. Т. XI. Оптико-электронные системы и лазерная техника. М.: Оружие и технологии, 2005. 719 с.
9. Фомин Я.А. Выбросы случайных процессов. М.: Связь, 1980. 216 с.
10. Системы технического зрения / под. ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. М.: Машиностроение, 1988. 424 с.
11. Быстров Р.П., Кузнецов Е.В., Соколов А.В. Функциональные устройства и элементная база радиотехнических средств // Вооружение. Политика. Конверсия. 2004. № 6. С. 30–35.
12. Развитие радиоэлектронной техники радиолокационных систем / Р.Н. Акиншин, Р.П. Быстров, Е.В. Кузнецов, Д.Ю. Михайлов, А.В. Соколов, Ю.С. Чесноков / Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 10. С. 24–55.
13. Бортовое радиоэлектронное и оптоэлектронное оборудование современных и перспективных летательных аппаратов / Н.Н. Евтихеев, Э.А. Засовин, Д.И. Мировицкий, Ю.С. Прозоровский. М.: МИРЭА, 1994. С. 84.
14. Глебович Л.А., Певунчиков И.В. Перспективные схемы построения инфракрасных приборов ориентации // Оптический журнал. 1998. № 8. С. 76–79.
15. Репин В.Г., Тартаковский Т.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. Радио, 1977. 432 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акиншин Николай Степанович, доктор технических наук, начальник отдела АО ЦКБА, nakinshin@yandex.ru.

Мамон Юрий Иванович, доктор технических наук, главный специалист АО ЦКБА, cdbae@cdbae.ru.

Старожук Евгений Андреевич, кандидат экономических наук, проректор по экономике МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru.

ANALYTICAL MODEL OF A DIFFERENTIAL METHOD FOR RECEIVING AND PROCESSING SIGNALS OF THE INFRARED RANGE OF WAVELENGTHS

Nikolay S. Akinshin¹, Jury I. Mamon¹, Evgeny I. Staroguk²

¹ CDBAE, Tula, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

One of the classic methods to improve the noise immunity of passive detection of infrared wavelength range (IKSO) is a differential inclusion of pyrocatechol, placed at some distance. An analytical model of a differential method of receiving infrared radiation from moving objects is introduced. A comparison with experimental results for moving objects of different types is made. Differential inclusion of sensors can be used not only to compensate the external interference, but also to determine the boundaries of a temporary "slot", inside which the movable object is most likely to be detected. The temporal boundaries are used for the decision making about the type and parameters of the movable object in complex device of object classification.

The principle of operation of IKSO, which is to record signals with diversity of pyrocatechol into the appropriate memory registers and output detection of the differential signal envelope. Subsequently, from the memory registers portions of a recording signal posted pyrocatechol are selected which are later processed to determine the temporal provisions of minimum minimum and maximum maximum. The direction of movement of the object above is determined by the delay or advance of the extrema of the signals of one sensor relative to another within a given temporal "slot".

It is shown that aggregation should be the following – the tool with a maximum radius of the zone of sensitivity should be active and the basic, but if there is a more reliable piece of information about the detected object which can implement a more refined classification of the object (for example, a group of people, wheeled vehicles-tracked vehicles, etc.). The conclusion is made about the advantages of differential option to include spaced sensors.

The results can be used in the development of infrared wavelengths passive detection in the conceptual design phase.

Key words: noise immunity, infrared, correlation function, model, mobile object

REFERENCES

1. **Kriksunov L.Z.** *Spravochnik po osnovam infrakrasnoy tekhniki* [The reference manual on fundamentals of infrared technique]. M., Soviet radio, 1978, p. 400. (in Russian)
2. **Magauyenov R.G.** *Sistemy okhrannoy signalizatsii. Osnovy teorii i printsipy postroyeniya* [Alarm systems. Basics of the theory and principles of creation]. M., Hot line-Telecom, 2004. (in Russian)
3. **Ott G.** *Metody podavleniya shumov i pomekh v elektronnykh sistemakh* [Methods of noise suppression and interference in electronic systems]. M., Mir, 1979. (in Russian)
4. **Gonorovsky I.S.** *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio engineering circuits and signals]. M., Radio, and communication, 1986, 511 p. (in Russian)
5. **Manayev E.I.** *Osnovy radioelektroniki* [Fundamentals of radio-electronics]. M., Radio and communication, 1985. (in Russian)
6. **Fedoseev V.I., Kolosov M.P.** *Optiko-elektronnye pribory orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov* [Optoelectronic devices for spacecraft orientation and navigation: Tutorial]. M., Logos, 2007, 248 p. (in Russian)
7. **Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G.** *Infrakrasnye sistemy «smotryashchego tipa»* [Infrared systems of "looking" type]. M., Logos, 2004, 444 p. (in Russian)
8. *Oruzhie i tekhnologii Rossii: Entsiklopediya. XXI vek* [Weapons and technologies of Russia: encyclopedia. XXI century]. Ed. by S. B. Ivanov. Vol. XI. Optoelectronic systems and laser equipment. M., Weapons and technologies, 2005, 719 p. (in Russian)
9. **Fomin Y.A.** *Vybrosy sluchaynykh protsessov* [Emissions of random processes]. M., Communication, 1980, 216 p. (in Russian)
10. *Sistemy tekhnicheskogo zreniya* [Vision systems]. Ed. by A.N. Pisarevsky, A.F. Chernyavsky. M., Mechanical Engineering, 1988, 424 p. (in Russian)
11. **Bystrov R.P., Kuznetsov E.V., Sokolov V.A.** *Funktsionalniye ustroystva i elementnaya baza radiotekhnicheskikh sredstv* [Functional devices and circuitry of electronic devices]. Weapons. Policy Conversion, 2004, No. 6, p. 30–35. (in Russian)
12. **Akinshin R.N., Bystrov R.P., Kuznetsov E.V., Mikhailov D.Yu., Sokolov A.V., Chesnokov Yu.S.** *Razvitie radioelektronnoy tekhniki radiolokatsionnykh sistem* [Development of electronic equipment for radar systems]. Successes of modern Radioelectronics, 2005, No. 10, pp. 24–55. (in Russian)
13. **Evtihiev N.N., Sanovin E.A., Mirovitskiy D.I., Prozorovsky Yu.S.** *Bortovoe radioelektronnoe i optoelektronnoe oborudovanie sovremennykh i perspektivnykh letatel'nykh apparatov* [On-board electronic and optoelectronic advanced equipment and perspective aircraft]. M., MIREA, 1994, 84 p. (in Russian)
14. **Glebovich L.A., Ivanchikov I.V.** *Perspektivniye shemy postroyeniya infakrasnykh priborov orientatsii* [Perspective models infrared devices orientation]. Journal of Optical, 1998, No. 8, pp. 76–79. (in Russian)

15. Repin V.G., Tartakovsky, T.P. *Statisticheskiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem* [Statistical synthesis under a prior uncertainty and adaptation of information systems]. M.: Sov. radio. 1977. 432 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay S. Akinshin, Doctor of Engineering, Head of Department of JSC TsKBA, nakinshin@yandex.ru.

Yury I. Mamon, Doctor of Engineering, Chief specialist of JSC TsKBA, cdbae@cdbae.ru.

Evgeny A. Staroguk, candidate of Economic Sciences, vice rector for economy of MSTU of N.E. Bauman, bauman@bmstu.ru.

Поступила в редакцию 11.07.2017
Принята в печать 20.09.2017

Received 11.07.2017
Accepted for publication 20.09.2017