

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

А. С. Жумабаева, К. А. Айжариков, Р. Р. Бикеев

### *Введение*

Сложность получения полной информации об объектах (процессах или явлениях) привела к появлению адаптивных моделей когерентных систем, управления и связи ими на основе оптимизационных методов. В них на основе оценок параметров наблюдаемого объекта (параметры которого неизвестны) параметры управления настраиваются таким образом, чтобы со временем вся наблюдаемая система и сам объект управления функционировали оптимально. Оптимизация самих алгоритмов моделирования, естественно, приведет к оптимальным адаптивным когерентным системам управления и связи подвижных объектов в условиях принятых ограничений на постановку задачи и научного исследования. Основной задачей обработки математической информации в таких системах является оценивание состояния объекта.

### *Постановка задачи*

Наиболее полной вероятностной характеристикой для оценки состояния объекта наблюдения является закон распределения вектора состояния, полученный на основании прямых или косвенных измерений, которые затем используются в алгоритмах обработки информации. Основные и дополнительные измерители на современных объектах могут рассматриваться как динамические системы со случайной скачкообразной структурой (ССС). Основным признаком для классификации данных систем СССР мы будем считать их марковость. Учет зависимости изменения структуры от фазовых координат переводит систему из класса марковских в класс условно марковских систем. Если такого учета не ведется, например, для систем массового обслуживания (СМО), которая учитывает только состояние структуры, но не содержит континуальных фазовых координат, что существенно упрощает задачу анализа наблюдения за объектом, тогда сложно становится создать алгоритмы, обеспечивающие требуемые (желаемые) показатели эффективности. Теория систем СССР является одним из основных направлений современного исследования широкого класса динамических систем на основе общей теории марковских процессов, состояние которых определяется вектором фазовых координат  $Y(t)$  и индексом структуры  $s$ . В основу построения рекуррентных алгоритмов положены такие фундаментальные, хорошо зарекомендовавшие себя при синтезе в марковских системах методы, как байесовский подход и динамическое программирование. Для таких систем характерны резкое изменение информационной обстановки во время приема/передачи радио-, оптических и акустических сигналов, вызванных перерывами в каналах связи и управления, а также постановкой помех (ПП). Облик современных когерентных систем (КС) составляют два вида систем радиолокационной техники. К первому виду относятся радиолокационные станции (РЛС), оптоэлектронные локационные станции (ОЭЛС) и т.д. КС «барьерного типа» просматривают пространство на просвет, т.е. если в барьерной зоне движется какой-либо объект-цель, то возникает дополнительный сигнал, который приводит к изменению структуры принимаемого сигнала (данное обстоятельство впервые было реализовано в первых отечественных РЛС). Второй вид – это обзорные системы РЛС, ОЭЛС и т.д. с импульсными зондирующими сигналами.

### *Общее описание моделей когерентных систем обнаружения подвижных объектов*

Когерентный прием устройств многофункциональной информационно-измерительной когерентной системы (ИИКС) представляет собой прием электромагнитного сигнала с известной

фазой, но на практике реализовать когерентный прием представляет собой затруднительную задачу и тогда прибегают к так называемому квазикогерентному приему электромагнитного сигнала, при котором опорные электромагнитные колебания, по фазе совпадающие с принимаемым сигналом, формируются с помощью узкополосных фильтров, систем фазовой автоподстройки частоты с использованием параметров входного сигнала.

Полной вероятностной характеристикой системы ИИКС полагаем функцию плотности вероятностей  $f(Y, s; t) = f^{(s)}(Y, t)$ , которая вполне характеризует распределение фазовых координат  $Y(t)$  и вероятность состояния структуры  $s(t)$  в некоторый момент времени  $t$

$$P_{(s)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f^{(s)}(Y, t) dY, s = \overline{1, S}. \quad (1)$$

Уравнениями Фоккера–Планка–Колмогорова к анализу плотности вероятности будут

$$\frac{\partial f(Y, s, t)}{\partial t} = -\text{div}\pi(Y, s, t) - \beta(Y, s, t) + \nu(Y, s, t); \quad s = \overline{1, n},$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(Y, s, t + \Delta t) - f(Y, s, t)}{\Delta t} = \frac{\partial f(Y, s, t)}{\partial t},$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\oint_{\Delta S(Y)} (n^0 \pi(Y, s, t)) dS}{\Delta \vartheta(Y)} = \text{div}\pi(Y, s, t),$$

где  $\beta(Y, s, t) = \nu(Y, s, t)$  – функции поглощения и восстановления марковского случайного процесса;  $n^0$  – орт нормали к поверхности пространства  $\Delta S(Y)$ ;  $\Delta \nu(Y)$  – элемент рассматриваемого объема;  $\pi(Y, s, t)$  – соответствующий вектор для потока плотности вероятности.

Интегрируя приведенную структуру, получим очередное выражение [1–3]

$$\dot{P}_{(s)}(t) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \text{div}\pi(Y, s, t) dY - \int_{-\infty}^{+\infty} (\beta(Y, s, t) - \nu(Y, s, t)) dY, \quad s = \overline{1, n},$$

отсюда  $\dot{P}_{(s)}(t) = -\beta_p^{(s)}(t) + \nu_p^{(s)}(t)$ ,  $s = \overline{1, n}$ , где  $\beta_p^{(s)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \beta(Y, s, t) dY$ ,  $\nu_p^{(s)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \nu(Y, s, t) dY$ .

Для исследования основных характеристик интенсивности поглощения сигнала и его восстановления при переходе из состояния  $s$  в состояние  $r$  и обратно, из  $r$  в  $s$ , используем соотношения переходов [1–3]:

$$\beta_p^{(s)}(t) = \sum_{r=1 \neq s}^n P^{(s)}(t) \beta_p^{(rs)}(t), \quad \beta_p^{(rs)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \beta^{(rs)}(Y, t) dY,$$

$$\nu_p^{(s)}(t) = \sum_{r=1 \neq s}^n P^{(r)}(t) \nu_p^{(sr)}(t), \quad \nu_p^{(sr)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \nu^{(sr)}(Y, t) dY,$$

оценку  $s$ -го состояния системы находим из общепринятых уравнений Колмогорова [1–3]:

$$\dot{P}_s = - \sum_{r=1}^S \left( \hat{P}_s \nu_{s_r} \left( \hat{Y}^{(s)}, R^{(s)}, t \right) - \hat{P}_r \nu_{r_s} \left( \hat{Y}^{(s)}, R^{(s)}, t \right) \right) + \frac{1}{2} \hat{P}_s \sum_{r=1}^S \hat{P}_r b^{(s)} \left( \hat{Y}^{(s)}, Z, t \right),$$

$$\dot{\hat{Y}}^{(s)} = f^{(s)} \left( \hat{Y}^{(s)}, t \right) + \sum_{r=1}^S \frac{\hat{P}_r(t)}{\hat{P}_s(t)} \nu_{r_l} \left( \hat{Y}^{(s)}, R^{(r)}, t \right) \left[ \hat{Y}^{(r)} - \hat{Y}^{(s)} \right] + R^{(s)} C^T \left( \hat{Y}^{(s)}, t \right) Q_Z^{-1} \left( Z - H \left( \hat{Y}^{(s)}, t \right) \right),$$

$$\begin{aligned} \dot{R}^{(s)} = & R^{(s)} \frac{\partial f^{(l)T}(\hat{Y}^{(s)}, t)}{\partial \hat{Y}} + \frac{\partial f^{(s)}(\hat{Y}^{(s)}, t)}{\partial \hat{Y}} R^{(s)} + f_0^{(s)}(\hat{Y}^{(l)}, t) f_0^{(s)T}(\hat{Y}^{(sl)}, t) - \\ & + \sum_{r=1}^S \frac{\hat{P}_r(t)}{\hat{P}_s(t)} v_{rs}(\hat{Y}^{(r)}, R^{(r)}, t) \left( R^{(r)} - R^{(s)} + (\hat{Y}^{(r)} - \hat{Y}^{(s)}) (\hat{Y}^{(r)} - \hat{Y}^{(s)})^T \right), \end{aligned}$$

где матрицы  $C, Q, Z, H$  считаем наблюдаемыми информационно-измерительной системой.

Методы и модели контроля за состоянием когерентных систем и протекающих в них процессов основываются на фундаментальных радиофизических методах. Фундаментальный подход предполагает оценку многокомпонентного взаимодействия протекающих процессов в теоретической постановке, подготовку к экспериментальным исследованиям на основе общей теории когерентности сигналов и, наконец, проведение экспериментов. Теория когерентных (точнее – квази-когерентных) сигналов электромагнитных волн основана на известных уравнениях Максвелла (описывающих циркуляцию векторов электрического и магнитного полей). Электромагнитное поле определяется совокупностью четырех векторов  $E, H, D$  и  $B$  ( $E$  – вектор напряженности электрического поля;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $D$  – вектор электрической индукции;  $B$  – вектор магнитной индукции), которые являются конечными и во всех обыкновенных точках непрерывными функциями пространства и времени. Разрывы непрерывности для данных векторов или их производных могут наблюдаться на граничных поверхностях раздела разных сред. Приведенные векторы электромагнитного поля подчиняются известным уравнениям Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H - \frac{\partial D}{\partial t} = 0, \quad \operatorname{rot} E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0, \\ \operatorname{div} D = 0, \quad \operatorname{div} B = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для того, чтобы приведенная система уравнений (2) была полной, необходимо добавить к ней дополнительную группу уравнений связи между векторами  $D$  и  $E, B$  и  $H$

$$D = D(E), \quad B = B(H).$$

Вид и свойства уравнений связи определяются свойствами среды в окрестности рассматриваемой точки. В простейших случаях для изотропной среды можно положить [4, 5]

$$D = \epsilon E, \quad B = \mu H,$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, при  $\epsilon = \mu = 1$  – вакуум.

Одним из частных решений вышеприведенных волновых уравнений Максвелла являются тригонометрические функции (простейшие условия) вида  $E = E_{\max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} + \alpha)$  – для электрического поля волны и  $H = H_{\max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} + \alpha)$  – для магнитного поля волны, в которых:  $E_{\max}, (\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} + \alpha)$  – максимальная амплитуда и полная фаза гармонического сигнала с длиной волны  $\lambda$  и начальной фазой  $\alpha$ , для второй компоненты электромагнитной волны  $H = H_{\max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} + \alpha)$ , рассуждаем аналогично. Применяем суперпозицию для двух линейно поляризованных волн с одинаковыми направлениями электромагнитных колебаний

$$E_1 = E_{\max 1} \cos(\omega t - kS_1 + \phi_1) \quad \text{и} \quad E_2 = E_{\max 2} \cos(\omega t - kS_2 + \phi_2),$$

где  $S_1, S_2$  – соответствующие пути, пройденные электромагнитными волнами до некоторой выбранной точки наблюдения  $\delta$ , дает результирующее движение колебаний также в виде гармонического колебания с некоторой интенсивностью

$$J_{1,2} = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos v_\delta, \quad v_\delta = (kS_1 - kS_2) + (\phi_1 + \phi_2) \quad (3)$$

и максимальной амплитудой колебаний в форме

$$E_{\max}^2 = E_{\max 1}^2 + E_{\max 2}^2 + 2E_{\max 1} E_{\max 2} \cos v_\delta. \quad (4)$$

Множество приемных радиотехнических устройств и квазикогерентных систем воспринимают интенсивность излучения как усредненную во времени, т.е.

$$v_\delta = (kS_1 - kS_2) + (\phi_1 + \phi_2) = \text{const}, \quad v_\delta > 0, \quad J_{1,2} > J_1 + J_2, \quad (\text{при } J_1 = J_2 \Rightarrow J = 4J_2).$$

Если элементарная тригонометрическая функция вида  $\cos v_\delta = 2n\pi, n = 1, 2, 3, \dots$ , то волны и их источники в отношении фаз будут согласованы друг с другом, т.е. когерентны. Таким образом монохроматическая волна – это есть когерентная волна и ее фаза не должна «сбиваться» во времени. Перераспределение интенсивностей с образованием соответствующих минимумов и максимумов в результате суперпозиции когерентных электромагнитных волн (сложение электромагнитных волн) в теории сигналов еще называют интерференцией [3]. Следует заметить, принципиальной разности между электромагнитными волнами разной частоты (длины) нет, она проявляется только при взаимодействии со средой или веществом. Электромагнитная волна не несет с собой никаких материальных объектов, она переносит лишь возмущение, приводящее к колебаниям. Волна является посредником, с помощью которого источник (колебательная система) воздействует на вещество, которое преобразует энергию волны в другие виды энергии. Саму же энергию, переносимую волной в одну секунду через единичную площадку волновой поверхности, называют интенсивностью волны (или плотностью потока электромагнитной энергии)  $I_w$ .

В практических задачах и математическом моделировании КС для многих подвижных объектов сигнал в электромагнитном поле характеризуется с соответствующими ему характеристиками, т.е. соответствующими амплитудой и фазой [1, 6, 7]:

$$U(t) = A(t) \exp[-j(\phi_M(t) + \phi_c(t))], \quad (5)$$

где  $A(t), \phi_c(t)$  – амплитуда и собственная фаза электромагнитного сигнала, временная зависимость которых объясняется флуктуациями квазикогерентного\* сигнала под воздействием случайных факторов;  $\phi_M(t)$  – фазовая модуляция компонент, которая вносится в электромагнитный сигнал для обеспечения его обнаружения с условием действия помехи системе ИИКС. Любой из этих параметров несет информацию об объектах различной природы и могут быть использованы для решения широких задач радиолокации. На основе метода усреднения когерентного во времени сигнала для не периодически движущихся с постоянной скоростью объектов имеем рабочую формулу [7]

$$I(r) = I_0(r) \frac{\sin^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} V(r)\tau \right]}{\left[ \frac{2\pi}{\lambda} V(r)\tau \right]^2}, \quad (6)$$

где  $I(r), I_0(r)$  – символы интенсивности сигнала от объекта-цели и интенсивности сигнала, соответствующего «невозмущенному» объекту;  $V(r), \tau$  – скорость перемещения и время наблюдения (экспозиции) объекта-цели;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения. В научно-экспериментальных работах профессоров И. В. Прангвишвили, А. Н. Ануашвили и В. В. Маклакова (ИПУ РАН) также получено аналогичное выражение для наблюдения интенсивности излучения (усредненного) при наблюдении объекта под некоторым углом  $\alpha$  [8–11]:

$$I_s = I_{0s} \sin^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} VT \cos \alpha \right], \quad (7)$$

при  $0 < VT \leq d$  и  $I_s = I_{0s} \left[ 1 - \frac{d}{VT \sin \alpha} \right]^2$ , если условие  $VT \sin \alpha \geq d$ , где  $d$  – геометрический размер наблюдаемой структуры (моделируемый объект наблюдения на интервале времени экспозиции

$T = \tau$ ). Одновременно авторами был разработан класс новых технических устройств на основе применения когерентного излучения в сочетании с вычислительной техникой.

Такие устройства обладают рядом важных преимуществ: параллельность обработки потока измерительной информации, высокое быстродействие, простота конструкции, возможность расширения классов контролируемых объектов и снятие ограничений на характер их движения. Открытие авторами закономерности проявления подвижных объектов позволило по новому рассмотреть вопросы обнаружения подвижных объектов с различными рассеивающими свойствами. Например, среди методов обнаружения малозаметного подвижного объекта с помощью пассивной системы, может найти применение метод когерентного приема некогерентного излучения. Для реализации данного метода обнаружения подвижных объектов в многофункциональной ИИКС необходимо применить два приемника, отдаленные друг от друга на некоторое расстояние. Один из этих датчиков используется для формирования объектного излучения, а другой – для опорного. Далее опорное и объектное излучения смешиваются в фазовом смесителе, и таким образом формируется когерентная компонента принимаемого излучения. Каждый элементарный участок подстилающей поверхности рассматривается как точечный источник излучения, который излучает электромагнитные волны в разные стороны. Таким образом, излучение от данной точки фона попадает на оба приемника излучения, поэтому в этих двух лучах одного и того же точечного источника колебательные процессы протекают согласованно (когерентно). Когда в поле зрения появляется подвижный объект, он меняет параметры этих излучений независимо от его отражающей способности и нарушает когерентность принимаемых волн, что и является сигналом обнаружения. Такое утверждение справедливо для всех точек фона. В целом получается суммарный эффект обнаружения объекта (эффект когерентного усиления).

### Заключение

Предложенный подход к математической обработке информации параметров излучения подвижного объекта позволяет повысить радиолокационный контраст цели на фоне отражений от подстилающей поверхности.

### Список литературы

1. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987. – 247 с.
2. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. Н. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов. – М. : Наука, 2006. – 579 с.
3. Юрков, Н. К. Повышение радиолокационного контраста. Системный подход : моногр. / Н. К. Юрков, А. В. Бухаров. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 398 с.
4. Мубаракшин, Р. В. Бортовые информационно-управляющие средства оснащения ЛА / Р. В. Мубаракшин, Н. В. Ким, М. Н. Красильщиков. – М. : МАИ, 2003.
5. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. – М. : Физмат, 1993. – 272 с.
6. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
7. Игошин, А. В. Снижение инфракрасной заметности БЛА путем нанесения на обшивку специальных покрытий / А. В. Игошин, А. В. Полтавский // Научно-технический сборник факультета КВВАИУ. – 1992. – Вып. 29. – С. 23–28.
8. Когерентный контроль координат основных модулей нежесткой фазированной антенной решетки беспилотного летательного аппарата / А. В. Полтавский, В. М. Бородуля, В. В. Маклаков, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 100–103.
9. Полтавский, А. В. Модификация модели системы управления подвижным объектом / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 65–70
10. Полтавский, А. В. Интеграции сигналов когерентной системы ГЛОНАСС/GPS / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2 (6). – С. 46–50.
11. Полтавский, А. В. Методы когерентного контроля подвижных объектов / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 22–31.

**Жумабаева Асель Сагнаевна**

старший преподаватель,  
кафедра космической техники и технологий,  
Евразийский национальный университет  
им. Л. Н. Гумилева  
(010000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)  
E-mail: almatyaseri@mail.ru

**Айжариков Куат Айдангалиевич**

преподаватель,  
кафедра радиоэлектронного оборудования  
летательных аппаратов,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова  
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)  
E-mail: aizharikov@mail.ru

**Бикеев Ринат Равхатович**

преподаватель,  
кафедра воздушной навигации  
и боевого применения авиации,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова  
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)  
E-mail: rinat\_bikeev@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются возможные варианты определения параметров и закона распределения излучения подвижных объектов в различной области спектра электромагнитных волн. Предложены модели для оценки таких параметров.

**Ключевые слова:** объект излучения, радиолокационная система, антенна, индикатриса.

УДК 681.321:517.958

**Жумабаева, А. С.**

**Математическая обработка информации параметров излучения подвижного объекта /**  
А. С. Жумабаева, К. А. Айжариков, Р. Р. Бикеев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. –  
№ 3 (11). – С. 99–104.

**Zhumabaeva Asel' Sagnaevna**

senior lecturer,  
sub-department of space engineering and technology,  
Eurasian National University  
named after L. N. Gumilev  
(010000, 2 Satpaeva street, Astana, Kazakhstan)

**Ayzharikov Kuat Aydangalievich**

lecturer,  
sub-department of radio-electronic equipment  
of the flight vehicles,  
Military Institute of the Air Defense Forces  
of the Republic of Kazakhstan  
named after T. Ya. Begel'dinov  
(463024, 16 A. Moldagulovoy avenue,  
Aktobe, Kazakhstan)

**Bikeev Rinat Ravkhatovich**

lecturer,  
sub-department of air navigation  
and combat employment of the aviation,  
Military Institute of the Air Defense Forces  
of the Republic of Kazakhstan  
named after T. Ya. Begel'dinov  
(463024, 16 A. Moldagulovoy avenue, Aktobe,  
Kazakhstan)

**Abstract.** Coherent method for realizing of the device for modules-units start monitoring of phased antenna array is suggested. Application area of the coherent method includes radar systems with improved special selectivity within systems for the detection of poorly-observable objects.

**Key words:** object radiation, radar system, antenna, indicatrix.