

МЕТОДИКА СОВМЕСТНОГО ПОИСКА И ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ

Г.В. Худов¹, А.П. Озерян², Р.В. Коренков²

(¹Харьковский университет Воздушных Сил, ²Центр управления полетами Национального центра управления и испытаний космических средств)

В работе разрабатывается методика совместного поиска и обнаружения объектов, приводятся основные расчетные соотношения для осуществления совместного поиска и обнаружения объектов по двум координатам.

поиск и обнаружение объектов, космические системы наблюдения

Общая постановка проблемы, анализ последних достижений и публикаций. В настоящее время целый класс информационных систем, в том числе и космических, используется для решения задачи поиска и обнаружения объектов в условиях ограниченного поискового потенциала [1 – 5]. При этом наиболее оптимальным является использование теории совместного поиска и обнаружения объектов [6 – 9]. В указанных работах синтезировано оптимальное байесовское правило принятия решения при совместном поиске и обнаружении объектов.

Цель статьи – разработка методики совместного поиска и обнаружения объектов в космических системах наблюдения (КСН) с использованием результатов работ [6 – 9].

Постановка задачи и изложение материалов исследований.

Рассмотрим задачу совместной оптимизации поиска и обнаружения объектов в круговой зоне обзора, когда априорное местоположение объекта по двум координатам x_1 и x_2 задается в виде усеченного нормального закона с нулевым математическим ожиданием

$$u(x_1 x_2) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где $A = 1 / (1 - \exp(-S^2/2\sigma^2))$ – нормирующая константа; S – радиус зоны обзора Ω ; σ – среднеквадратическое отклонение; $x_1^2 + x_2^2 = S^2$, при этом центр зоны обзора совпадает с началом координат.

Одновременное решение сформулированной в [6, 7] оптимизационной

задачи и дифференциального уравнения Аркина применительно к задаче совместной оптимизации поиска и обнаружения объектов – довольно сложная задача. Для ее решения уточним физический смысл используемых при формулировке оптимизационной задачи и решении дифференциального уравнения Аркина величин. Учтем, что в теории поиска [10] при формулировке оптимизационной задачи неудовлетворительно решен вопрос выбора закона обнаружения объекта. Не учитываются при этом известные в теории обнаружения сигналов ограничения на величину условной вероятности правильного обнаружения объекта, обусловленные допустимым уровнем ложных тревог. Уточним оптимизационную задачу применительно к задаче совместной оптимизации поиска и обнаружения объектов в КСН.

При этом условную вероятность обнаружения $P(\gamma_1/H_1, X)$ (γ_1 – принимаемое решение об обнаружении объекта в окрестности точки с координатами $X = (x_1, x_2)$; H_1 – гипотеза о нахождении объекта в окрестности точки с координатами $X = (x_1, x_2)$) применительно к КСН необходимо трактовать как условную вероятность правильного обнаружения объекта (вероятность обнаружения объекта в окрестности точки с координатой $X = (x_1, x_2)$ при условии, что объект действительно находится в окрестности точки с координатой x). Значение условной вероятности правильного обнаружения должно зависеть от конкретной фоно-целевой обстановки, типа бортового обнаружителя КСН, видов сигналов от объектов и рассчитываться для типовых случаев, рассмотренных в теории обнаружения сигналов [11].

Применительно к задаче поиска и обнаружения объектов в КСН оптимизационную задачу запишем в следующем виде:

$$P_1^{no}(\gamma_1, t) = \int_{\Omega(t)} u(x, t) P^{no}(\gamma_1 / H_1, x) dx \rightarrow \max;$$

$$\lambda(x, t) = \lambda_0(t) \geq 0, x \in \Omega(t), t > 0; \quad (2)$$

$$\int_{\Omega(t)} \lambda_0(t) dx = L_0, t > 0; \quad \int_{t(x)}^t \lambda_0(t) dt = \varphi(x, t); \quad \int_{\Omega(t)} \varphi(x, t) dx = \Phi(t),$$

где $P_1^{no}(\gamma_1, t)$ – безусловная вероятность правильного обнаружения объекта в текущей зоне обзора $\Omega(t)$; $P^{no}(\gamma_1 / H_1, x)$ – условная вероятность правильного обнаружения объекта в окрестности точки X на момент времени t ; $\lambda_0(t)$ – функция плотности мощности или стратегия поиска (плотность условной вероятности правильного обнаружения объекта по координате t ; $m(\Omega(t))$ – мера текущей зоны обзора $\Omega(t)$; $\lambda_0(t)dt$ – условная вероятность правильного обнаружения объекта в окрестности

точки X за время dt ; $P(\gamma_1/H_1, \Omega(t))$ – условная вероятность правильного обнаружения объекта в зоне $\Omega(t)$ за время $[0, t]$; $\Phi(t)$ – величина, ограниченная энергетическим потенциалом бортового обнаружителя.

Без потери общности заменим двумерный усеченный нормальный закон (1) двумерным нормальным:

$$u(x_1 x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Для сформулированных условий найдем решение уравнения Аркина [6, 7, 10], в котором искомой величиной является площадь текущей зоны обзора

$$m(\Omega(t)) = z(t).$$

Предварительно найдем функцию распределения величины $z(t) = z$. Для этого введем новую переменную

$$y = x^2 = x_1^2 + x_2^2. \quad (4)$$

Учтем, что $\pi x_1^2 = \pi x_2^2 = z$, следовательно, из (4) находим $\pi y = 2z$, т.е.

$$y = 2z/\pi. \quad (5)$$

В (4) величина y является квадратом случайной величины, распределенной по закону Релея, и для которой функция распределения есть экспоненциальный закон [11]:

$$W(y) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{y}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

В (6) произведем замену переменных (5) и учтем, что

$$dy = \frac{2}{\pi} dz.$$

В результате замены переменных, интегрируя (6), получим искомую плотность распределения

$$u(z) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{z}{\pi\sigma^2}\right). \quad (7)$$

Учитывая результаты работ [6, 7], а также с учетом (7) имеем

$$\frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{z}{\pi\sigma^2}\right) \geq C(z). \quad (8)$$

Решая полученное неравенство (8) относительно z , определим координаты границы области первичного поиска Ω_C :

$$z \leq \pi\sigma^2 \cdot \ln\left(1/(\pi \cdot \sigma^2 \cdot C(z))\right). \quad (9)$$

Следовательно, первичная зона поиска представляет собой круг с центром в начале координат, а мера области первичного поиска – пло-

щадь этого круга. В соответствие с (9) границы области распространения стратегии поиска определяются выражением

$$z = m(\Omega_C) = \pi\sigma^2 \cdot n\left(1/\left(\pi \cdot \sigma^2 \cdot C(z)\right)\right). \quad (10)$$

откуда [6, 7]:

$$C(z) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{z(t)}{\pi\sigma^2}\right). \quad (11)$$

Выражение (11) определяет поверхности равных уровней априорной плотности вероятности местоположения объекта. Видна экспоненциальная зависимость функции $C(z)$ от размеров текущей зоны обзора $\Omega(t)$. В рассматриваемом примере это означает, что просмотр зоны обзора Ω необходимо начинать с δ -окрестности точек, координаты которых соответствуют максимуму функции $u(z)$. С течением времени плоскость, параллельная плоскости координат, опускается к ней в соответствии с выражением (11). Проекция этой плоскости на плоскость координат определяет размеры и положение текущей зоны обзора $\Omega(t)$.

Производная по z от функции $C(\Omega(t))$ имеет вид

$$C'(\Omega(t)) = -\frac{1}{\pi^2\sigma^4} \exp\left(-\frac{z(t)}{\pi\sigma^2}\right). \quad (12)$$

В рассматриваемом случае $\frac{C(z)}{C'(z)} = \pi\sigma^2 = \text{const}$, поэтому с учетом начального условия $\Omega(0) = 0$, принимая $L(t) = L_0$ [10], имеем

$$z(t) = \sigma\sqrt{2\pi L_0 t}. \quad (13)$$

Как видно из (2.52) текущая зона обзора $\Omega(t)$ представляет собой круг с центром в начале координат, а ее мера – площадь этого круга

$$z(t) = m(\Omega(t)) = \pi r^2(t), \quad (14)$$

радиус которой определим подстановкой (13) в (14), откуда

$$r(t) = \sqrt{\sigma^4 \frac{2L_0 t}{\pi}}. \quad (15)$$

Для случая равномерной плотности распределения объекта в зоне обзора при поиске объекта по двум координатам имеем

$$u(z) = \frac{1}{m(\Omega)} = \frac{1}{\dot{s}T}, \quad \text{при } -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}, \quad (16)$$

где \dot{s} – скорость просмотра зоны обзора Ω , $\dot{s}T = m(\Omega)$; (17)

Условие нормировки для закона (16) запишем как

$$\int_{-T/2}^{T/2} \frac{\dot{s}t}{\dot{s}T} dt = 2 \int_0^{T/2} \frac{\dot{s}t}{\dot{s}T} dt = 1. \quad (18)$$

Для произвольных координат $u(z) = 1/(\pi z)$. (19)

Область первичного поиска определим, используя (19):

$$u(z) \geq C(z). \quad (20)$$

Из неравенства (20) видно, что область первичного поиска в рассматриваемом случае совпадает со всей зоной обзора, а мера области первичного поиска – площадь всей зоны обзора πS^2 :

$$z(t) = m(\Omega_C) = 1/C(z),$$

откуда

$$C(z) = 1/z(t). \quad (21)$$

Производная по z от функции $C(z)$ имеет вид

$$C'(z) = -1/z^2(t). \quad (22)$$

Подставляя выражения (21), (22) в дифференциальное уравнение Аркина [6, 7, 10], имеем

$$dz = L(t)dt. \quad (23)$$

Решение уравнения (23) с учетом нулевого начального условия получаем в виде

$$z(t) = \int_0^t L(\tau)d\tau. \quad (24)$$

В выражение для меры области распространения стратегии поиска $z(t)$ входит неизвестная функция $L(t)$, определяемая стратегией поиска $\lambda(x, t)$ как

$$L(t) = \int_{\Omega(t)} \lambda(x, t)ds,$$

где ds – площадь элементарного участка поиска и обнаружения.

Учитывая известное соотношение $\dot{s} = \frac{ds}{dt}$, можно записать

$$L(t) = \int_{\Omega(t)} \lambda(x(\tau), t)\dot{s}d\tau, \quad (25)$$

где $\lambda(x(\tau), t)d\tau$ – условная вероятность обнаружения объекта в окрестности точки X за время $d\tau$.

Соответственно $\int_{\Omega(\tau)} \lambda(x(\tau), t)d\tau$ – условная вероятность обнаружения объекта в текущей зоне обзора $\Omega(\tau)$.

Для равномерно-оптимальной стратегии [6, 7, 10] получим уравнение

$$L(t) = \frac{1}{T} \int_{\Omega(t)} \frac{u(x(\tau), t)}{C} \dot{s}d\tau,$$

в котором $\int_{\Omega(t)} u(x(\tau), t) d\tau$ – вероятность нахождения объекта в текущей зоне обзора $\Omega(t)$ к моменту времени t .

Применительно к КСН потребуем, чтобы $C=1/T$ и учтем, что вероятность нахождения объекта в текущей зоне обзора $\Omega(t)$ при $t \rightarrow T$ была равна 1, т.е. $\int_{\Omega(T)} u(x(\tau), T) d\tau = 1$.

Тогда, в соответствии с рекомендациями работы [10]:

$$L(t) = L_0 = \dot{s}, \quad (26)$$

где \dot{s} – скорость поиска объекта, зависящая от тактико-технических характеристик бортового обнаружителя и численно равная допустимой скорости поиска объекта (скорости просмотра площади поиска) при заданных вероятностных характеристиках обнаружения.

Для принятого условия (26) получим для равномерного закона выражение (24) в виде

$$z(t) = \dot{s}t. \quad (27)$$

Для дальнейших расчетов можно воспользоваться величиной \dot{s} , характерной для современных бортовых обнаружителей радиолокационных КСН. Для этого можно считать, что в бортовом радиолокационном обнаружителе луч бортовой антенны осуществляет поиск объектов по одной координате, а обзор заданной зоны осуществляется за счет поступательного перемещения космического аппарата (КА). Учтем, что для бортового радиолокатора с синтезированной апертурой ширина зоны обзора $L_{обз}$ определяется величиной [12]

$$L_{обз} = 10^4 \delta R,$$

где δR – разрешающая способность бортовой радиолокационной станции (РЛС) в направлении вектора скорости движения. Тогда величину \dot{s} можно найти как $\dot{s} = L_{обз} v_{КА} / T$, где $v_{КА}$ – скорость движения КА.

Разрешающую способность бортовой РЛС в режиме детальной съемки можно принять равной 1 м [12].

Уравнение (27) означает, что при равномерной априорной плотности распределения текущая зона обзора представляет собой круг с равномерно расширяющейся площадью. Причем мера текущей зоны обзора в этом случае полностью определяется скоростью просмотра зоны обзора Ω – функцией $L_0 = \dot{s}$.

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, в работе разработана методика совместного поиска и обнаружения

объектов в КСН, приведены основные расчетные соотношения. В дальнейших исследованиях необходимо оценить величину энергетического выигрыша, полученного при использовании разработанной методики совместного поиска и обнаружения и равномерном распределении энергетического потенциала по зоне обзора для различных типов КСН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аерокосмічна розвідка в локальних війнах сучасності: досвід, проблемні питання і тенденції: Монографія / Л.М. Артюшин, С.П. Мосов, Д.В. П'ясковський, В.Б. Толубко. – К.: НАОУ, 2002. – 202 с.*
2. *Попов М.О. Шляхи отримання космічної інформації в інтересах національної безпеки та оборони // Наука і оборона. – 2003. – № 2. – С. 38 – 50.*
3. *Зарубіжні системи дистанційного зондування Землі з космосу подвійного призначення / О.О. Негода, В.Б. Толубко та інші. – К.: НАОУ, 2005. – 271 с.*
4. *Космическая съемка Земли. Спутники оптической съемки Земли с высоким разрешением / Под ред. А.А. Кучейко. – М.: Радиотехника, 2001. – 135 с.*
5. *Машков О.А., Сівов М.С., Заклевський Д.Є. Організація розвідувальних космічних угруповань в антитерористичній операції в Афганістані (2001 – 2002 рр.): Навч. посібн. – К.: НАОУ, 2002. – 71 с.*
6. *Голкин Д.В., Худов Г.В. Совместная байесовская оптимизация поиска и обнаружения объектов в радиолокационных системах // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 11. – С. 23 – 32.*
7. *Голкин Д.В., Худов Г.В. Совместная байесовская оптимизация поиска и обнаружения объектов в космических радиолокационных системах дистанционного зондирования // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 84 – 93.*
8. *Худов Г.В. Особенности оптимизации двухальтернативных решений при совместном поиске и обнаружении объектов // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 5. – С. 51 – 59.*
9. *Пат 71735 А України, МКИ G01S13/04. Спосіб сумісного пошуку і виявлення радіолокаційних об'єктів: пат. 71735 А України, МКИ G01S13/04/ Голкин Д.В., Худов Г.В., Коновалов В.М., Пастушенко М.С. (Харківській військовий університет). -заявл. 17.11.2003; опубл. 15.12.2004. Бюл. № 12.*
10. *Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. – 246 с.*
11. *Я.Д.Ширман, В.Н.Манжос Теорія і техніка обробки радіолокаційної інформації на фоні помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с*
12. *Лифанов Ю.С. Саблін В.Н., Федоринов А.Н., Шапошников В. И. Направлення розвитку сучасних радіолокаційних засобів і систем розвідки наземних цілей. Ч. 1. Радіолокаційні системи космічного базирования // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 5. – С. 3 – 14.*

Поступила 11.10.2005

Рецензент: доктор технічних наук, професор Д.В. Голкин,
Харківський університет Воздушних Сил.