

# ОПТИКО–ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ю.В. Баранов

Астрономическое общество, ГП “НПО Астрофизика”, г. Москва, Россия

Оптико–электронный комплекс обнаружения опасных космических объектов (ОКО) является составной частью системы защиты Земли (СЗЗ) от ОКО и предназначен для решения следующих задач:

- обнаружение космических объектов (астероидов и комет);
- определение траекторий космических объектов;
- выявление ОКО (объектов, сближающихся с Землей);
- расчет места и времени встречи ОКО с Землей;
- определение характеристик астероидов и комет: формы, структуры, спектро–фотометрических характеристик, характеристик движения относительно центра масс;
- выдача целеуказаний на средства перехвата ОКО;
- определение координат перехватчиков ОКО для коррекции траекторий перехватчиков.

Комплекс должен обеспечивать обнаружение и измерение характеристик космических объектов в окосолнечном космическом пространстве в пассивном режиме, используя отраженную от объекта энергию излучения Солнца. Для определения координат перехватчиков может применяться активный режим работы с использованием собственных передатчиков комплекса.

Структура комплекса определяется концепцией построения системы защиты Земли и предъявляемыми к комплексу в рамках принятой концепции требованиями. Совместно с разработчиками концепции ближнего перехвата опасных космических объектов [1] определены следующие основные технические требования к оптико–электронному комплексу.

Разрабатываемый комплекс должен обнаруживать космические объекты диаметром не менее 20 м, движущиеся с радиальными скоростями по отношению к Земле до 70 км/с. Минимальная дальность обнаружения космического объекта должна быть не менее 15 млн. км. Максимальная угловая скорость движения космического объекта 1 градус в секунду.

Вероятность обнаружения космического объекта с приведенными выше характеристиками должна быть не менее  $P_0 = 0,99$ . Вероятность ложного обнаружения должна быть не более  $P_{лт} = 10^{-3}$  за экспозицию.

Для расчета энергетических характеристик оптико–электронного комплекса предполагается, что объект имеет форму шара с диффузно–отражающей поверхностью и коэффициентом отражения в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4 - 0,8$  не менее  $\eta = 0,1$ .

Зона работы комплекса — небесная сфера за исключением зоны радиусом 10 градусов от направления на центр Солнца. К моменту достижения опасным космическим объектом рубежа 10 млн. км от Земли комплекс должен в полном объеме выдать всю требуемую от него информацию об объекте.

Так как Солнце является мощным источником электромагнитного излучения в видимом диапазоне длин волн (0,4–0,8 мкм), и техника и практика наблюдения небесных объектов в этом диапазоне хорошо отработаны, в качестве прототипа комплекса обнаружения опасных космических объектов можно принять сеть наземных оптико–электронных станций, аналогичных, например, станциям системы SPACETRACK.

Реально наземная оптико–электронная станция начинает работать, когда Солнце погружается на 5–10 градусов за горизонт. Кроме того, эффективность станции снижается при углах места космического объекта меньших 5–10 градусов. Это определяется повышенным фоном неба на вертикале Солнца, значительным поглощением излучения на почти горизонтальных трассах и большой турбулентностью приземного слоя атмосферы. Таким образом, рабочая зона оптико–электронной станции с учетом вращения Земли может составлять 340 градусов, а время эффективной работы в течение суток — около 10–11 часов при расположении станции в экваториальной зоне Земли.

Одним из условий определения количества станций является минимальное время  $t_{\min}$  между обзорами зоны ответственности (измерениями координат космического объекта), необходимое для вычисления траектории космического объекта с требуемой для прогнозирования его дальнейшего

движения точно. С одной стороны это время должно быть достаточно большим, чтобы единичные ошибки измерения координат меньше влияли на ошибки расчета траектории движения объекта, с другой стороны оно не должно составлять значительной части времени работы комплекса по опасному космическому объекту. Принимаем допустимой потерю времени на обнаружение объекта равную 10% времени полета ОКО до Земли, то есть 6 часам, тогда количество станций, минимально необходимое для обеспечения беспропускного контроля космического пространства

$$N = \frac{360^\circ}{t_{\min} \cdot 15^\circ / h} = 4. \quad (1)$$

$t_{\min}$  определяет также максимально возможное время экспозиции участка неба одним телескопом или совокупностью телескопов.

Число наблюдательных часов в местах с хорошим астроклиматом может достигать  $t_n = 1500 - 2000$  часов в год. Поэтому, с приближенным учетом погоды общее количество станций должно быть 10–12.

Угловые размеры астероидов на минимально допустимой дальности обнаружения обычно меньше реального углового разрешения системы атмосфера–телескоп, определяемого турбулентностью атмосферы, то есть размер изображения космического объекта в фокальной плоскости телескопа определяется состоянием атмосферы. Турбулентность атмосферы для достаточно хороших в смысле астроклимата мест на Земле принимаем равной 2 угл. сек. Близкое к оптимальному согласование фотоприемника с телескопом получается при размере элемента разрешения фотоприемника примерно равном размеру изображения объекта в фокальной плоскости. Если фотоприемником является квадратная ПЗС–матрица размером  $(4 \times 4) \cdot 10^6$  элементов, то мгновенное поле зрения телескопа будет

$$S_m = (8 \times 8) \cdot 10^6 (\text{ang. sec})^2 = (2,22 \times 2,22) \text{ sq. deg.}$$

В каждой экспозиции определяются объекты в поле зрения телескопа, производится сравнение изображения в поле зрения телескопа с атласом, определяются объекты, не указанные в атласе, и определяются их координаты.

Обнаружение астероидов всегда ведется на фоне неба, который при наблюдениях с Земли определяется в основном рассеянным в атмосфере солнечным излучением, а при наблюдениях из космоса космическим фоном. Фон неба при наблюдении объекта из космоса незначительно меньше фона ночного неба в местах с хорошим астроклиматом на Земле и для расчетов их можно принять соответственно равными  $23 - \frac{22 \text{ magnitude}}{(\text{ang. sec})^2}$ . При малых световых потоках прием оптического сигнала

ведется в режиме счета отдельных фотонов. Число регистрируемых за время экспозиции фотонов является случайной величиной. Принимаем, что поток фотонов имеет пуассоновский характер и дисперсия числа принимаемых за время экспозиции фотонов равна математическому ожиданию. Сигнал, принимаемый телескопом, считается сигналом от объекта, если число фотонов за время экспозиции в элементе разрешения фотоприемника превосходит пороговый уровень. При нормальной аппроксимации пуассоновского закона распределения заданная вероятность ложной тревоги  $P_{\text{лт}}$  обеспечивается при величине порога  $\bar{n}_t = \bar{n}_h + A\sqrt{\bar{n}_h}$ . Заданная вероятность обнаружения сигнала  $P_0$  обеспечивается при математическом ожидании суммы фотонов от фона неба и объекта превышающем порог на величину  $B\sqrt{\bar{n}_o + \bar{n}_h}$ , то есть

$$\bar{n}_o + \bar{n}_h = \bar{n}_h + A\sqrt{\bar{n}_h} + B\sqrt{\bar{n}_o + \bar{n}_h}, \quad (2)$$

где величины  $A$  и  $B$  определяются через интеграл вероятностей и при заданных вероятностях правильного обнаружения и ложной тревоги равны  $A = 3,1$  и  $B = 2,33$ . Выражение (2) позволяет определить площадь телескопа, необходимую для обнаружения объекта с заданными вероятностными характеристиками

$$S_t = \frac{1}{t_e \cdot \beta} \left( \frac{A\sqrt{\bar{n}_h} + B\sqrt{\bar{n}_o + \bar{n}_h}}{\bar{n}_o} \right)^2. \quad (3)$$

где  $t_e$  — время экспозиции;

$\beta$  — коэффициент передачи тракта: объект– фотоприемник;

$n_o, n_h$  — плотности потоков фотонов от объекта и фона.

Зависимость необходимого диаметра телескопа от угла между направлением на Солнце и направлением на объект приведена на рис. 1. График рассчитан для диаметра обнаруживаемого астероида  $d = 20$  м, фона неба 22 зв. величины, дальности 15 млн. км, времени экспозиции  $t_e = 4$  с, коэффициенте передачи тракта объект–выход фотоприемника  $\beta = 0,25$  и размере элемента разрешения фотоприемника  $S_p = 2 \times 2 (\text{ang. sec})^2$ .

Из проведенного анализа видно, что для обнаружения астероидов даже в условиях малых фонов необходимы достаточно большие телескопы. Для работы в сумерках площадь апертуры телескопа должна быть увеличена, что трудно как технологически так и экономически. Поэтому, оценим возможности обнаружения астероидов задавшись приемлемым размером апертуры телескопа.

Величины фона неба в зените при разных зенитных углах Солнца взяты из [3]. Фон неба на углах, близких к горизонту на вертикале Солнца, превышает фон неба в зените приблизительно в 20 раз. Для приближенного расчета фона на разных зенитных углах принимаем квадратичную аппроксимацию зависимости величины фона от зенитного угла в направлении к Солнцу

$$I = I_0 \left[ 1 + 19 \left( \frac{z}{90} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

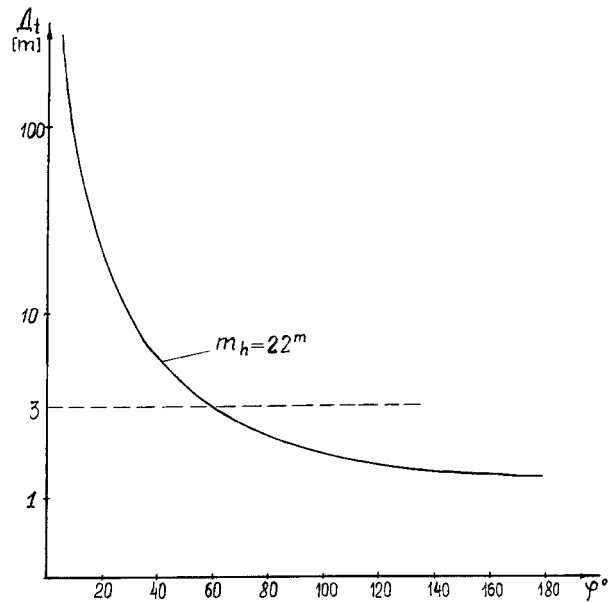


Рис. 1. Зависимость диаметра телескопа от угла освещения объекта ( $t_e = 4$  с,  $D = 15 \cdot 10^6$  км,  $d_0 = 20$  м).

Необходимые для обнаружения плотности потока сигнала от объекта

$$n_o = \frac{A \sqrt{n_{ho} S_p}}{\sqrt{S_i t_e \beta}} - \frac{B^2}{2 S_i t_e \beta} + B \sqrt{\frac{n_{ho} S_p}{S_i t_e \beta} + \frac{A}{S_i t_e \beta} \sqrt{\frac{n_{ho} S_p}{S_i t_e \beta} + \frac{B^2}{4 (S_i t_e \beta)^2}}}. \quad (5)$$

Зная требуемые плотности потока сигнала от объекта из геометрических построений, определяем на каких дальностях выполняются требуемые вероятностные характеристики обнаружения космических объектов. Уравнение для расчета зон обнаружения

$$1 - \frac{5,216 \cdot 10^{42} d^2 \eta}{n_o D^2 (D^2 + R^2 - 2 DR \cos \varphi)} K = 0, \quad (6)$$

где

$$K = 1 - \cos \left( \varphi + \arcsin \frac{D \sin \varphi}{\sqrt{D^2 + R^2 - 2DR \cos \varphi}} \right)$$

при  $D \cos \varphi \leq R$  и

$$K = 1 + \cos \left( \varphi - \arcsin \frac{D \sin \varphi}{\sqrt{D^2 + R^2 - 2DR \cos \varphi}} \right)$$

при  $D \cos \varphi > R$ .

Коэффициент  $5,216 \cdot 10^{42}$  имеет размерность  $[1/c]$ ;  $R = 1$  а. е.

Вид рассчитанных по этим формулам зон обнаружения космических объектов при  $P_0 = 0,99$  и  $P_{лт} = 10^{-3}$  за время экспозиции  $t_e = 4$  с приведен на рис. 2.

Для контроля области пространства в направлениях близких, к направлению на, Солнце, сеть наземных телескопов может быть дополнена космическими телескопами, для которых Земля может использоваться как экран, закрывающий их от прямого солнечного излучения, либо телескопы могут быть установлены в космосе в соответствии с предложением [2] на космических платформах с коррек-тирующими двигателями малой тяги.

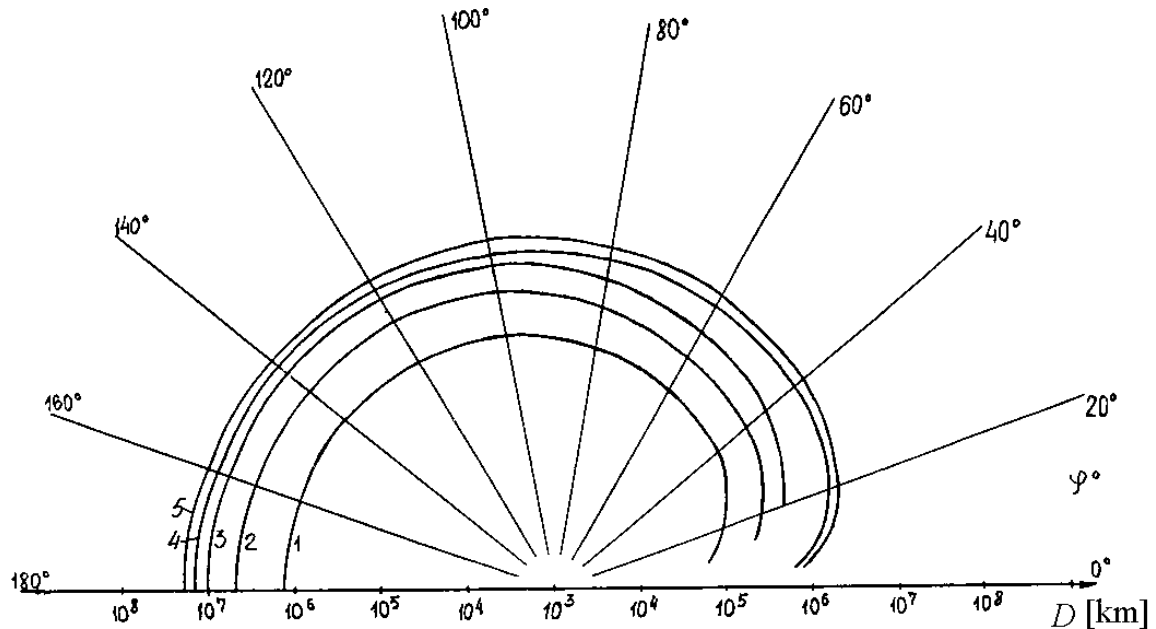


Рис. 2.1. Зоны обнаружения объекта. З — Земля, С — Солнце, Л — Луна.  $d = 10$  м,  $S_l = 10$  м<sup>2</sup>,  $\xi_1 = 5^\circ$ ,  $\xi_2 = 10^\circ$ ,  $\xi_3 = 15^\circ$ ,  $J_4 = 22^m$ ,  $J_5 = 23^m$ .

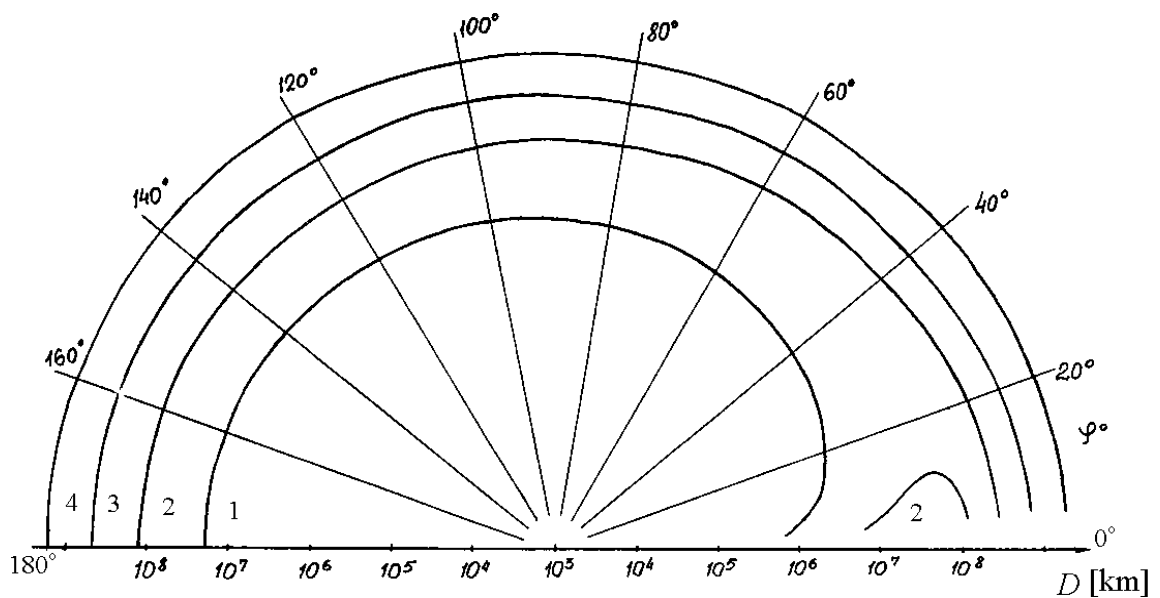


Рис. 2.2. Зоны обнаружения объекта. З — Земля, С — Солнце, Л — Луна.  $J = 23^m$ ,  $S_l = 10 \text{ м}^2$ ,  $d_l = 10 \text{ м}$ ,  $d_2 = 10^2 \text{ м}$ ,  $d_3 = 10^3 \text{ м}$ ,  $d_4 = 10^4 \text{ м}$ .

Опико–электронный комплекс обнаружения опасных космических объектов представляет собой достаточно сложную систему, состоящую из большого числа станций, распределенных по поверхности Земли и находящихся в космосе. Структурная схема разрабатываемого опико–электронного комплекса обнаружения опасных космических объектов представлена на рис. 3. Составные части комплекса должны выполнять следующие задачи.

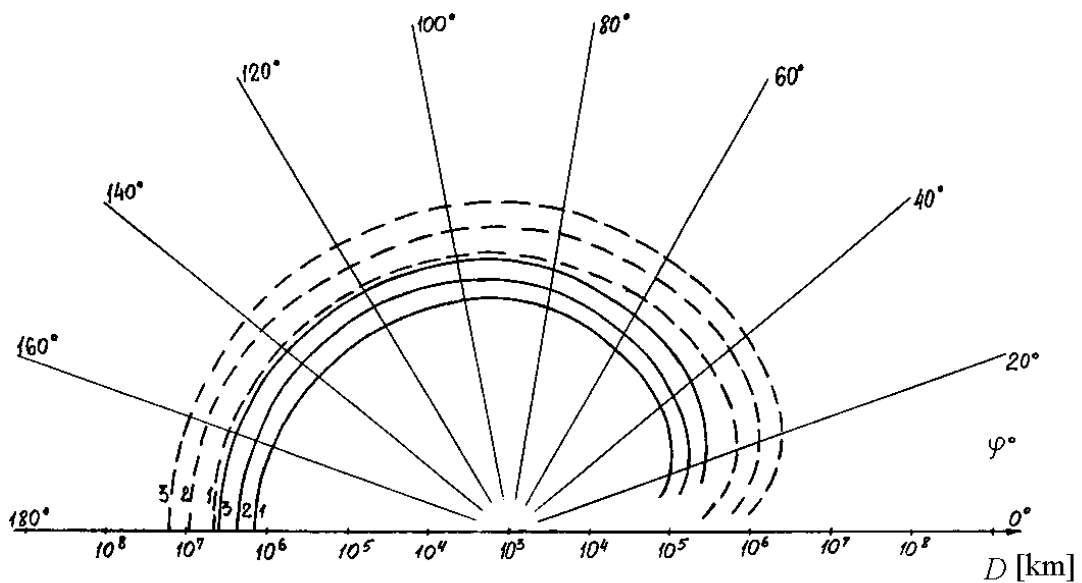


Рис. 2.3. Зоны обнаружения объекта. З — Земля, С — Солнце, Л — Луна.  $d = 10 \text{ м}$ , —  $\xi = 10^\circ$ , ---  $J = 23^m$ ,  $S_{l_1} = 0,1 \text{ м}^2$ ,  $S_{l_2} = 1 \text{ м}^2$ ,  $S_{l_3} = 10 \text{ м}^2$ .



Рис. 3. Структурная схема оптико–электронного комплекса обнаружения опасных космических объектов.

Центр контроля астероидной опасности ведет каталог космических объектов (астероидов и комет), осуществляет оперативное управление станциями обнаружения, принимает от наземных и космических станций информацию об их техническом состоянии и о вновь обнаруживаемых космических объектах, рассчитывает время и место встречи ОКО с Землей, рассчитывает координаты места падения ОКО на Землю, передает в Центр управления системы защиты Земли от ОКО информацию об опасных космических объектах.

Станции обнаружения по целеуказаниям Центра контроля астероидной опасности ведут поиск космических объектов, определяют их координаты, передают в Центр контроля астероидной опасности координатную, фотометрическую и другую информацию об обнаруженных космических объектах.

После обнаружения объекта и отнесения его к категории опасных, комплекс должен переключиться в режим точного измерения параметров движения опасного объекта. Это может быть осуществлено как переключением режима работы одной или нескольких станций обнаружения, так и введением в работу специализированных станций (оптических или радиолокационных).

Комплекс средств связи обеспечивает обмен информацией между станциями, Центром контроля астероидной опасности и Центром управления системы защиты Земли от ОКО.

## Выводы

1. Создание оптико–электронного комплекса обнаружения опасных космических объектов является реальной технической задачей при использовании существующей элементной базы.

2. Для уточнения возможностей и улучшения потенциальных характеристик разрабатываемого комплекса необходимо:

- уточнение космической обстановки в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения;
- уточнение расчетной модели космического объекта;
- поиск на Земле мест с хорошим астроклиматом для размещения наземных станций обнаружения;
- разработка требований по необходимым точностям измерения координат космических объектов для обеспечения прогнозирования траекторий их движения.

## Литература

1. Алимов Р.В., Дмитриев Е.В. Система ближнего перехвата опасных космических объектов. Доклад на Международной конференции “Астероидная опасность–96”. Астероидная опасность–96: Тез. докл. междунар. конф. Астероидная опасность–96/ РАН. Ин–т теор. астрон; под ред. А.Г. Сокольского. СПб.: Изд–во ИТА РАН, 1996. 23 с..
2. Бодин Б.В., Емельянов В.А., Левицкий Ю.Е., Черяткин И.А. Космическая система предупреждения об астероидной опасности. Устное сообщение на Международной конференции “Астероидная опасность–96”.
3. Розенберг Г.В. Сумерки. –М.: Физматгиз, 1963, 380 с..