

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-3-361-366

Наблюдение космических объектов при широком диапазоне изменения дальности

© 2020 г. А.К. Цыцулин^{1*}, А.И. Бобровский², А.И. Морозов¹

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт телевидения»,
Санкт-Петербург, Россия

²Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем,
Санкт-Петербург, Россия

*tsytsulin@niitv.ru

Observation of space objects at a wide range of distance changes

A.K. Tsytsulin^{1*}, A.I. Bobrovskiy², A.I. Morozov¹

¹Joint stock company «Television Research Institute», Saint Petersburg, Russia

²State Research Institute of Applied Problems», Saint-Petersburg, Russia

*tsytsulin@niitv.ru

Received February 2, 2020

Revised March 19, 2020

Accepted June 1, 2020

Keywords: adaptation, distance, large detail, large detail horizon, luminance, point object, space object.

Summary. The dependence of luminance in the focal plane of the lens when observing space objects in a widerange of distances, relevant in the problems of spacecraft proximity and dockingcontrol, is considered. The well-known formulas for the dependence of luminance on the distance, powered by two, and relative aperture of the lens are generalized, and it is shown that there is a smooth transition between these dependencies in the region called large detail horizon. Smoothness of the transition is caused by a change in the image size of an object in a focal plane, determined by the convolution of the point scattering function and object projection onto the focal plane. A formalization of the image dynamic characteristics is proposed, based on measuring of sum of modules of object image interframe difference that changes as the object approaches the observer. An opportunity of working distance range expanding at long and short distances using frame frequency adaptation is shown.

Citation: Tsytsulin A.K., Bobrovskiy A.I., Morozov A.I. Observation of space objects at a wide range of distance changes. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2020, 64 (3): 361–366. [In Russian]. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-361-366.

Поступила 2 февраля 2020 г.

После доработки 19 марта 2020 г.

Принята к печати 1 июня 2020 г.

Ключевые слова: адаптация, горизонт крупной детали, космический объект, освещённость, расстояние, точечный объект.

Рассмотрена зависимость освещённости в фокальной плоскости объектива при наблюдении космических объектов в широком диапазоне дальностей, актуальная в задачах контроля сближения и стыковки космических аппаратов. Обобщены известные формулы зависимостей освещённости от квадрата расстояния, коэффициента усиления и относительного отверстия объектива.

Для цитирования: Цыцулин А.К., Бобровский А.И., Морозов А.И. Наблюдение космических объектов при широком диапазоне изменения дальности // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 3. С. 361–366. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-361-366.

Введение

В «Предложениях по созданию средств для орбитальной сборки» [1, с. 445–447]

С.П. Королёв сформулировал проблему обеспечения сближения космических аппаратов (КА) на орбитах спутников Земли и наметил несколько стратегически важных этапов освое-

ния сборки орбитальных станций, неоднократно отмечая необходимость ряда итераций (он выделил восемь этапов процесса сближения и стыковки КА). Не останавливаясь на этапах предварительного целеуказания и собственно стыковки КА, отметим, что С.П. Королёв уделял внимание и дальней дистанции, которая «продолжается до тех пор, пока корабль не подойдёт к ракетному блоку на расстояние 5–10 км», и ближней дистанции, когда «корабль приближается (этап автоматического сближения) к ракетному блоку до расстояния 100–200 м». Итерационный метод контроля сближения КА в основных своих чертах за прошедшие десятилетия не претерпел изменений [2]. Как и задумывал С.П. Королёв, поэтапность процесса сближения (в частности, выделение этапов и методов дальнего и ближнего наведения) как с маневрирующими, так и с неманеврирующими КА стала реализацией важного принципа итерационного приближения к цели. В частности, телекамеры имеют переключаемый масштаб изображения благодаря использованию объективов с разными фокусными расстояниями [3].

При определении требуемой чувствительности аппаратуры наблюдения в ходе её проектирования используют различные формулы для различных дистанций. Для очень больших расстояний («точечные» объекты) используют сформулированную И. Кеплером зависимость убывания освещённости по квадрату расстояния (например, [4–6]). Для относительно малых расстояний («крупная» деталь) опираются на независимость сигнала от расстояния и его убывание на расстояниях, сравнимых с фокусным расстоянием объектива (например, [4–5]). Необходимость проектирования аппаратуры для контроля сближения КА на всех дистанциях между ними (изменяющихся на пять порядков — примерно от 100 км до 1 м) определяет потребность в методе расчёта сигналов в диапазоне дистанций, охватывающем и большие, и малые расстояния до объекта наблюдения.

Методика расчёта освещённости фотоприёмника при изменении расстояния до объекта

Соотношение сигналов на ближней и дальней дистанции характеризуется на концептуальном уровне следующим образом [4, с. 430]: «Когда предмет с большим протяжением, рассматриваемый под значительным углом, удаляется, то освещённость сетчатки изображением этого предмета не меняется, так как расстояние до предмета не входит в формулу (VI.7), <включающую яркость объекта и квадрат относительного отверстия объектива>. Однако по мере того, как предмет удаляется, его угловые размеры уменьшаются и, наконец, наступает момент, когда изображение занимает одну клетку сетчатки; с этого момента освещённость сетчатки падает обратно пропорционально квадрату расстояния».

Формулы для освещённости, создаваемой светом, отражённым от объекта, на ближней и дальней дистанции [4, 5], хотя и отличаются по виду, выводятся из одной и той же схемы наблюдения (рис. 1).

Для выявления основной зависимости освещённости фотоприёмника от расстояния до объекта не будем останавливаться на подробностях, связанных с учётом самых близких дистанций (подробно рассмотренных, например, [4, 5]) и угла ψ Солнце–объект–наблюдатель (например, [6]). Это означает допущения: объект освещается и наблюдается по нормали к его поверхности, $\psi \approx 0$; расстояние R много больше фокусного расстояния f объектива ($R \gg f$) в силу чего расстояние между объективом и фотоприёмником $f' = fR/(R \mp f)$ приближённо равно фокусному расстоянию $f' \approx f$.

Для определения зависимости освещённости $E_{\text{фп}}$, создаваемой объектом на фотоприёмнике, от расстояния до объекта примем, что:

площадь объекта S_0 равна квадрату его линейного размера h_0 (определяющего угол α , под которым наблюдается объект, $\text{tg } \alpha = h_0/R$); $S_0 = h_0^2$;

линейный размер изображения объекта, удалённого на бесконечность, определяется

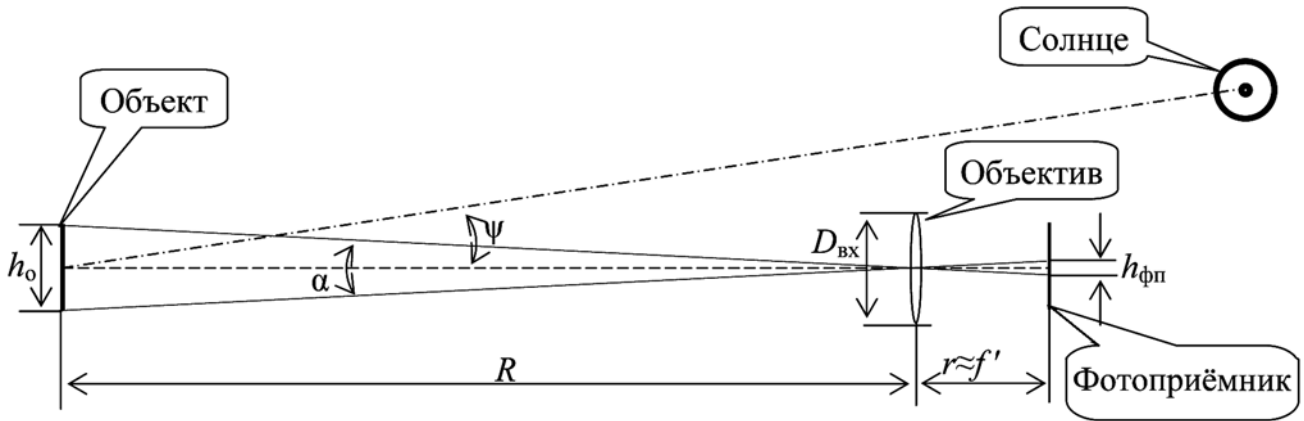


Рис. 1. Схема наблюдения объекта
Fig. 1. Object observation scheme

диаметром d функции рассеяния точки (ФРТ) объективом (диаметром «кружка рассеяния»); площадь изображения объекта, находящегося на конечном расстоянии $R < \infty$, определяется свёрткой изображения объекта с ФРТ; оценка сверху размера изображения определяется квадратом суммы диаметра d функции рассеяния точки объективом и проекции объекта на фотоприёмник $h_{фп} = h_0 f / R$:

$$S_{фп} \approx \left(d + \frac{h_0 f}{R} \right)^2; \quad (1)$$

объект облучается Солнцем с известной и постоянной освещённостью E_0 , имеющей для околоземных орбит порядок $1,3 \times 10^5$ лк;

объект рассеивает свет равномерно во всей полусфере и характеризуется коэффициентом отражения света $k \leq 1$ (изменяется в широких пределах, есть оценки для конкретных КА $k \approx 0,1$ [6]);

объектив характеризуется площадью входного зрачка $S_{вх} \approx \frac{\pi}{4} D_{вх}^2$ и коэффициентом τ светопропускания;

наблюдение ведётся на фоне космоса с пренебрежимо малой яркостью.

Тогда с учётом известной связи освещённости в фокальной плоскости объектива $E_{фп}$ с собираемым световым потоком Φ , определяемым силой света I от наблюдаемого объекта (например, [4, 5]), получим:

сила света, отражённого объектом

$$I = \frac{1}{\pi} k E_0 S_0; \quad (2)$$

освещённость входного зрачка объектива

$$E_{вх} = \frac{k E_0 S_0}{\pi R^2}; \quad (3)$$

световой поток, собираемый объективом от объекта

$$\Phi_{вх} = \frac{k E_0 S_0 S_{вх}}{\pi R^2} = \frac{k E_0 S_0 D_{вх}^2}{4 R^2}. \quad (4)$$

Оценка снизу освещённости, создаваемой объектом на фотоприёмнике с учётом (1) и (4)

$$E_{фп} = \frac{\Phi_{фп}}{S_{фп}} = \frac{k E_0 \tau D_{вх}^2 h_0^2}{4 R^2 \left(d + \frac{h_0 f}{R} \right)^2}. \quad (5)$$

Отсюда следуют оба частных случая «точечного» объекта и «крупной детали», дающие известные формулы (например, [4, 5]).

Для первого случая следует пренебречь вторым членом в скобке знаменателя, для второго — первым.

На дальней дистанции (при $d \gg h_0 f / R$)

$$E_{фп} = \frac{k E_0 \tau D_{вх}^2 h_0^2}{4 R^2 d^2}, \quad (6)$$

здесь отношение $D_{вх}^2 / d^2$ называется коэффициентом усиления объектива [7] и освещённость обратно пропорциональна квадрату расстояния до объекта.

На ближней дистанции при $d \ll h_0 f / R$

$$E_{\text{фп}} = \frac{kE_0 \tau D_{\text{вх}}^2}{4f^2}, \quad (7)$$

здесь отношение $D_{\text{вх}}/f$ называется относительным отверстием или геометрической светосилой объектива, и как отмечено в приведённой цитате из [4, с. 430], расстояние до предмета не входит в формулу.

Анализ показывает, что ключевым параметром для перехода от «точечного» объекта к «крупной детали» является соотношение диаметра d функции рассеяния точки объективом и размера проекции объекта $h_{\text{фп}} = h_0 f / R$. Введём обозначение дистанции, на которой размеры d и $h_{\text{фп}}$ становятся равными, как $R_0 = h_0 f / d$. Расстояние R_0 имеет смысл «горизонта крупной детали» (хотя и размытого). Тогда формула (5) преобразуется к виду:

$$E_{\text{фп}} = \frac{kE_0 \tau D_{\text{вх}}^2}{4f^2 \left(1 + \frac{R}{R_0}\right)^2}. \quad (8)$$

График зависимости нормированной освещённости, создаваемой объектом, от расстояния (рис. 2), полученный на основе формулы (8), показывает её монотонное убывание с плавным переходом от ближней дистанции к дальней, т.е. от «крупной детали» к «точечному» объекту, и охватывает основную часть диапазона относительных расстояний, с которым

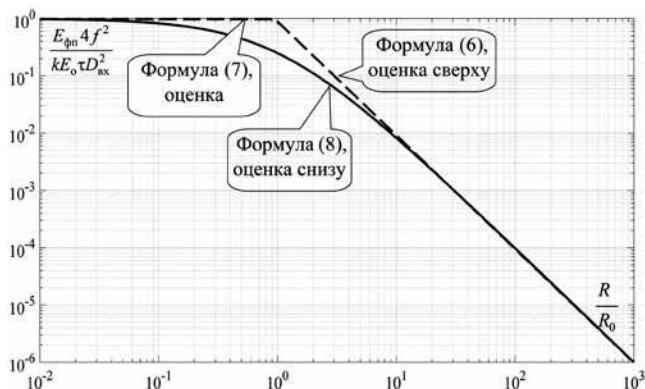


Рис. 2. Зависимость нормированной освещённости, создаваемой объектом, от нормированного расстояния

Fig. 2. The dependence of the normalized illumination created by the object, from the normalized distance

имеют дело современные системы контроля сближения и стыковки транспортных кораблей к Международной космической станции (МКС) [3]. График (см. рис. 2) показывает, что, строго говоря, нет «момента» перехода от крупной детали к точечному объекту, он есть только для оценок сверху для освещённости, создаваемой объектом, определяемых формулами (6) и (7).

Обсуждение

Полученное обобщение (5) и (8) известных формул (6) и (7) описывает гладкий переход от дальней зоны к ближней, т.е. от точечного объекта к крупной детали, в котором можно условно выделить «горизонт крупной детали», соответствующий равенству размеров функции рассеяния точки объективом и проекции объекта на фотоприёмную матрицу. Полезность полученных формул (5) и (8) состоит в возможности оценки интенсивностей сигналов на протяжении всего процесса сближения космических аппаратов при изменении дистанции более, чем на 6 порядков. «Горизонт крупной детали», т.е. дальность R_0 , может изменяться в широких пределах. Например, в действующих системах контроля сближения транспортных кораблей с МКС на средних и малых дистанциях используются две телекамеры с горизонтами крупной детали R_0 примерно 10 и 4 км [3]. В перспективных многофункциональных космических системах наблюдения искусственных космических объектов благодаря увеличению фокусного расстояния и входного зрачка объективов, а также форматов фотоприёмных матриц, «горизонт крупной детали» R_0 будет отодвигаться существенно дальше — до тысяч километров, обеспечивая классификацию КА с расстояния в сотни километров. Отметим, что в гораздо большем масштабе размеров с горизонтом крупной детали (без использования этого термина) в астрономии часто имеют дело, например, при различении звёзд и далёких галактик и при оценке фазы освещения планет Солнцем. В этом контексте горизонт крупной детали R_0 согласно широко известным крите-

риям Джонсона примерно соответствует границе между решением задач обнаружения объектов и определения их ориентации.

Горизонт крупной детали R_0 может также трактоваться как расстояние, на котором угловой размер α объекта равен угловому разрешению β системы наблюдения, определяемого отношением размера d функции рассеяния точки объективом и его фокусного расстояния f : $\text{tg}\beta = d/f$, т.е. при $R=R_0$ $\text{tg}\alpha = \text{tg}\beta$, что соответствует $\alpha = \beta$.

Формулы (5), (8) могут быть изложены с учётом фиксированного соотношения размеров диаметра d функции рассеяния точки объективом и ребра Δ пиксела фотоприёмной матрицы. Например, при использовании критерия минимума средней квадратической ошибки оценивания координат объекта на функцию рассеяния точки объективом должна приходиться локальная матрица 3×3 пиксела [3]. И наоборот, концепция, изложенная в [4, с. 430], может быть изложена с опорой не на размер чувствительной клетки (аналога пиксела), а на размер функции рассеяния точки оптической системой. Методологическое единство формул (5), (8) и следствий из них (6) и (7) состоит в изменении на горизонте крупной детали R_0 лишь формы зависимости параметров сигнала от квадрата расстояния. Дальше горизонта крупной детали R_0 с квадратом расстояния изменяется освещённость от объекта (амплитуда сигнала), а ближе горизонта крупной детали R_0 пропорционально квадрату расстояния изменяется площадь изображения объекта, хотя

освещённость от объекта (амплитуда сигнала) остаётся постоянной.

Важным следствием изменения в широких пределах освещённости, создаваемой объектом на фотоприёмной матрице, является необходимость адаптации методов накопления сигнала. В силу очень широкого изменения в течение сеанса сближения и амплитуды сигнала, и наблюдаемой скорости движения, а также изменения масштаба изображения, адаптация накопления сигнала в фотоприёмной матрице подразделяется на этапы [8]. Для расширения другого, более далёкого от наблюдателя «горизонта» — горизонта обнаружения космических аппаратов, или горизонта чувствительности [3, 9], на дальней дистанции актуально снижение кадровой частоты и её увеличение (адаптация) относительно граничного минимального значения. На средней и ближней дистанции необходима адаптация времени накопления при любой фиксированной (превышающей минимальную) кадровой частоте [10]. На самой ближней дистанции, отмеченной в «Предложениях...» [1, с. 445–447] как дистанция в несколько сотен метров, в силу ограниченной скорости считывания сигнала с фотоприёмных матриц и высокой важности особенно для этого этапа сближения минимизации задержек формирования управления сближением КА актуальна адаптация (повышение) кадровой частоты сверх возможной при номинальной чёткости (паспортном числе пикселей), достигаемой за счёт сокращения чёткости группированием или прореживанием пикселей [3, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Творческое наследие* Сергея Павловича Королёва. Избранные труды и документы / Под ред. М.В. Келдыша. М.: Наука, 1980. 592 с.
2. *Легостаев В.П., Микрин Е.А.* История создания систем управления космических аппаратов // *Автоматика и телемеханика*. 2013, № 3. С. 15–37.
3. *Теория и практика* космического телевидения / Под ред. А.А. Умбиталиев, А.К. Цыцулина. СПб.: АО «НИИ телевидения», 2017. 368 с.
4. *Слюсарев Г.Г.* Расчёт оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
5. *Бабенко В.С.* Оптика телевизионных устройств. М.–Л.: Энергия, 1964. 256 с.

REFERENCES

1. The creative heritage of Sergei Pavlovich Korolev. Selected works and documents. Ed. M.V. Keldysh. Moscow: Nauka, 1980: 592 p. [In Russian].
2. *Legostaev V.P., Mikrin E.A.* History of the creation of spaceship control systems. *Avtomatika i telemekhanika*. 2013. 3: 15–37. [In Russian].
3. *Teoriya i praktika kosmicheskogo televideniya*. Theory and practice of space television. Ed. A.A. Umbitaliev, A.K. Tsytsulin. Saint-Petersburg: JSC «Television Research Institute», 2017: 368 p. [In Russian].
4. *Slyusarev G.G. Raschyot opticheskikh sistem*. Calculation of optical systems. Leningrad: Mashinostroenie, 1975: 640 p. [In Russian].

6. Электронный ресурс: <http://www.sat.belastro.net>.
7. Хромов Л.И., Смирнов В.Д. Влияние параметров оптической системы на предельную чувствительность телевизионных систем // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения, 1981. Вып. 4. С. 3–7.
8. Бобровский А.И. Теоретические основы синтеза бортовых адаптивных видеоинформационных систем // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2019, Вып. 4. С. 74–78.
9. Девяткин А.В., Цыцулин А.К., Бобровский А.И., Морозов А.В., Горшанов Д.Л., Павлов В.А. Адаптация кадровой частоты к этапам наблюдения в системе контроля сближения космических аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2019, Вып. 1. С. 31–38.
10. Цыцулин А.К., Лысенко Н.В., Манцветов А.А., Баранов П.С., Бобровский А.И. Автоматическое управление чувствительностью в телевизионных системах // Оптический журнал, 2019, Вып. 9. С. 30–37.
11. Бобровский А.И. Обработка видеоинформации в адаптивной системе контроля сближения космических аппаратов // Информация и космос. 2018, №4. С. 149–153.
5. Babenko V.S. *Optika televizionnyh ustrojstv*. Optics of television devices. Moscow–Leningrad: Energia, 1964: 256 p. [In Russian].
6. URL: <http://www.sat.belastro.net>.
7. Khromov L.I., Smirnov V.D. Influence of optical system parameters on the television systems limiting sensitivity. *Technika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika televideniya*. 1981. 4: 3–7. [In Russian].
8. Bobrovsky A.I. Theoretical foundations of synthesis of onboard adaptive video information systems. *Technika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika televideniya*. 2019. 4: 74–78. [In Russian].
9. Devyatkin A.V., Tsytsulin A.K., Bobrovsky A.I., Morozov A.V., Gorshanov D.L., Pavlov V.A. Frame rate adaptation to the stages of observation in the space ship proximity control system. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*. 2019. 1: 31–38. [In Russian].
10. Tsytsulin A.K., Lysenko N.V., Mantsvetov A.A., Baranov P.S., Bobrovsky A.I. Automatic sensitivity control in television systems. *Optical journal*, 2019. 9: 30–37. [In Russian].
11. Bobrovsky A.I. Video information processing in adaptive system of space ship proximity control system. *Informaciya i kosmos*. 2018. 4:149–153. [In Russian].