

УДК 520.2.01

PACS number: 95.55.Fw

А. Д. ЕГОРОВ, В. А. ЕГОРОВ, С. А. ЕГОРОВ,  
Л. И. ЕЛЕНСКАЯ, И. Е. СИНЕЛЬНИКОВИнститут радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

## ТЕЛЕСКОПЫ ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПА

*Предмет и цель работы: Исследуется баланс разрешающей и светособирающей (проницающей) способностей телескопов при прямом обнаружении экзопланет земного типа для телескопов со сплошной и разреженной апертурой. Оценивается роль квантовых флуктуаций светового потока в видимом и инфракрасном диапазонах. Изучаются способы борьбы с дифракционным рассеянием разреженной апертуры в условиях большого контраста светимостей звезды и планеты. Методы и методология: Задача разрешающей способности рассматривается в приближении Фраунгофера. В одном варианте анализируется способ синтеза аподизирующей функции телескопа с разреженной апертурой с помощью алгоритма “восхождения на вершину”. Исследуется эффективность рекурсивного подхода при формировании аподизирующей функции для парциальных субапертур.*

*Результаты работы: Получены зависимости максимальной дальности обнаружения экзопланет земного типа путем прямых наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах от длины волны и размера апертуры. Они свидетельствуют об отсутствии сбалансированности светособирающей и разрешающей способностей телескопов со сплошной апертурой для различных спектральных диапазонов при учете квантовых флуктуаций светового потока. Предлагается осуществлять балансировку разрешающей и светособирающей способностей телескопов, используя разреженную апертуру. Предлагаются оптические схемы для борьбы с хроматическим эффектом при обзорных интерферометрических наблюдениях.*

*Заключение: Переход в инфракрасный диапазон с использованием разреженной апертуры улучшает степень сбалансированности и уменьшает соотношение светимостей центральной звезды и планеты. Для борьбы с увеличенным дифракционным размытием изображений в телескопах с разреженной апертурой предлагается аподизация с рекурсивным использованием биномиальных коэффициентов не только для объектива в целом, но и для парциальных субапертур. Отмечаются достоинства длиннофокусной малосветосильной оптической схемы.*

*Ключевые слова:* экзопланеты, баланс разрешающей и светособирающей способностей телескопов, аподизирующая функция

### 1. Введение

Несмотря на общие принципы функционирования всех телескопов, для решения разных задач в астрономической науке и практике обычно применяют узкоспециализированные их разновидности. Так, для астрометрических работ используют меридианные круги и пассажные инструменты, в звездной астрономии применяют широкоугольные камеры, Солнце изучают с помощью спектрогелиографов и т. д. Обнаружение планет за пределами Солнечной системы (экзопланет) является одной из важных задач планетологии и также требует своего специфического инструментария. Особенно актуальной является эта проблема для программы SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) в связи с расширенным толкованием парадокса Ферми [1].

В этой статье мы не ставили перед собой цели разработать проект конкретного телескопа,

а только рассмотрели общие принципы и потенциальные возможности создания таких инструментов в ближайшем и отдаленном будущем. Все оценки являются приближенными и служат в основном для ориентирования в тенденциях и направлениях развития этой отрасли приборостроения. Мы придерживаемся принципа технического совершенства, высказанного когда-то Ф. Дрейком, который гласит: технологические трудности производства всего, что не запрещено законами природы, будут со временем преодолены. В связи с этим мы не старались вникать в технологические подробности, а рассматривали только существенные для решения нашей задачи особенности телескопов.

До настоящего времени задача обнаружения экзопланет решалась преимущественно непрямыми методами. В этом случае изучается влияние планеты на гравитационно связанную с ней звезду, которую значительно проще наблюдать в силу ее большей, по сравнению с планетой, светимости.

© А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров,  
Л. И. Еленская, И. Е. Синельников, 2016

Такое влияние может сказываться на скорости, траектории, светимости звезды или на других ее характеристиках. Наибольшее количество экзопланет обнаружено по доплеровским измерениям лучевых скоростей (спектральный метод) и вариациям светимости (транзитный метод). Из геометрических соображений понятно, что спектральным методом нельзя обнаружить планету, вращающуюся в плоскости, перпендикулярной к лучу зрения, а транзитному методу доступны только те планеты, орбитальная плоскость которых совпадает с направлением на звезду.

Несомненно, наиболее полные и убедительные знания об удаленных космических объектах дают прямые наблюдения. Возможно, согласно принципу Ф. Дрейка, когда-то будут созданы телескопы, с помощью которых можно будет рассматривать поверхность экзопланет с необходимой степенью подробности. Но мы всегда ограничены в ресурсах и должны искать оптимальные пути преодоления возникающих сегодня трудностей. Поэтому мы анализируем возможности наблюдательных средств с разреженной апертурой, которые, как показала практика телескопостроения в радиодиапазоне, могут быть дешевле и проще в изготовлении, чем обычные телескопы с заполненной апертурой. Практика телескопостроения последних лет свидетельствует о том, что с увеличением апертуры и расширением спектрального диапазона необходимо строить инструменты космического базирования. В этом случае значительно упрощаются проблемы устранения рефракционных помех, гравитационных и температурных влияний, а также уменьшается воздействие других вредных факторов. Поэтому в настоящей статье мы рассматриваем только такие телескопы.

Критерии выбора рабочего диапазона электромагнитных колебаний в основном связаны с проблемами величины лучистого потока и углового разрешения. Согласно закону смещения Вина длина волны, при которой яркость абсолютно черного тела максимальная, зависит от его температуры. Для Солнца, имеющего температуру около 6000 К, это волны видимого оптического диапазона вблизи 0.5 мкм. Земля имеет температуру около 300 К и, соответственно, максимально излучает на длине волны около 10 мкм. Кроме собственного излучения, вызванного температурой, планеты отражают свет центрального светила. Таким образом, кривая зависимости светимости Земли от длины вол-

ны  $\lambda$  имеет два максимума – при  $\lambda = 0.5$  мкм и при  $\lambda = 10$  мкм. В связи с тем что Земля поглощает/отражает приблизительно половину падающего на нее света, амплитуды этих максимумов в энергетическом выражении приблизительно одинаковы.

Из соображений повышения разрешающей способности желательно использовать коротковолновую часть спектра, так как дифракционное рассеяние электромагнитных волн пропорционально их длине. Но с уменьшением длины волны, при той же мощности светового потока, возрастают принципиально неустраняемые квантовые шумы и повышаются требования к точности изготовления оптических поверхностей. Оптимальное соотношение светособирающей способности и разрешающей силы астрономических инструментов зависит от входных параметров решаемой задачи. В связи с этим рассмотрим геометрические характеристики телескопов, которые необходимы для решения задачи обнаружения землеподобных экзопланет в видимой и инфракрасной областях спектра.

## 2. Разрешающая и проникающая способности телескопов

В связи с громадной удаленностью астрономических объектов телескопы работают в практически параллельных лучах и все дифракционные явления обычно анализируются в приближении Фраунгофера. В этом приближении разрешающая способность телескопа [2] определяется угловым размером элемента разрешения  $\delta$ :

$$\delta = k \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – угловое расстояние в радианах от центра изображения точечного источника до первого минимума аппаратной функции телескопа;  $k$  – коэффициент, зависящий от формы апертуры;  $\lambda$  – длина волны;  $d$  – геометрический размер апертуры. Коэффициент  $k$  равен 1.2 для заполненной круглой апертуры и 0.7 для кольца исчезающе малой толщины такого же внешнего диаметра. В дальнейшем  $k$  будем считать равным единице. Тогда элемент углового разрешения в радианной мере  $\delta$  будет приблизительно равен безразмерному параметру  $\lambda/d$ . Элемент разрешения на объекте наблюдения в линейной мере равен произведению его углового размера на расстояние между телескопом и объектом.

В рамках настоящей статьи нас в первую очередь интересует задача обнаружения землеподобной планеты около звезды, аналогичной по параметрам Солнцу. Проанализируем, на каком расстоянии возможно увидеть такую планету отдельно от диска центрального светила.

Для наблюдателя, удаленного от солнечной системы на расстояние  $R$ , угловое расстояние Земли от Солнца  $\phi$  равно:

$$\phi = \frac{U}{R},$$

где  $U$  – расстояние от Земли до Солнца (астрономическая единица). Максимальное расстояние  $R$ , при котором разрешаются эти два объекта, получим из сравнения выражений для  $\phi$  и  $\delta$ :

$$R \leq U \frac{d}{\lambda}.$$

Если выразить астрономическую единицу  $U$  и световой год  $L$  в метрах, а длину волны  $\lambda$  в микронах, то получим выражение для  $R_r$  (индекс  $r$  – от слова resolution) в световых годах:

$$R_r \leq K_r \frac{d}{\lambda}, \quad (2)$$

где константа  $K_r = 10^6 UL^{-1}$ .

Достаточная разрешающая способность является первым необходимым условием для раздельного восприятия наблюдаемых объектов. Вторым необходимым условием констатации факта регистрации планеты раздельно от звезды является наличие светового потока достаточной интенсивности.

Точность измерения приходящего потока электромагнитной энергии определяется соотношением сигнал/шум на выходе детектора. Суммарный шум зависит от величины аппаратных шумов детектора, уровня шумов фона окружающего пространства и шумов, обусловленных квантовой природой самого потока. В силу упомянутого выше принципа технического совершенства шумы детектора можно сделать как угодно малыми, влияние фона тоже можно значительно ослабить, а в ряде случаев свести к пренебрежимо малой величине. Например, при рассмотрении подробностей на поверхности планеты сам планетный диск закрывает телескоп от космического фона. Фон создают источники, находя-

щиеся в пространстве между телескопом и планетой. По этой причине желательно выносить телескоп за пределы земной атмосферы. Таким образом, только квантовые шумы принципиально не могут быть устранены никакими техническими усовершенствованиями. Поскольку количество приходящих квантов представляет случайную величину, подчиняющуюся закону распределения Пуассона, относительная ошибка измерения потока зависит от количества зарегистрированных квантов  $n$  как  $1/\sqrt{n}$ .

Пусть время фотометрирования составляет  $\tau$  секунд, апертура телескопа квадратная со стороной  $d$  метров, отражение/поглощение падающей на планету электромагнитной энергии центрального светила происходит в соответствии с ее сферическим альбедо  $A$ , которое может принимать значения от нуля до единицы, отражение происходит в полусферу ( $2\pi$  стерадиан), а переизлучение поглощенной энергии в полную сферу ( $4\pi$  стерадиан).

Как мы уже ранее отмечали, основной поток электромагнитного излучения от планеты сосредоточен в двух спектральных областях. Одна область, которая связана с отраженным планетой световым потоком центральной звезды, находится вблизи максимума спектральной кривой излучения звезды (для Солнца это около 0.5 мкм). Другая область связана с переизлучением в инфракрасном диапазоне поглощенной планетой лучевой энергии центрального светила. Для Земли это соответствует длине волны около 10 мкм.

Зависимость спектральной мощности излучения нагретых тел от длины волны описывается известной формулой Планка [3], но с достаточной для данного рассмотрения степенью точности и для обеспечения простоты и наглядности будем считать, что вся отраженная энергия сосредоточена на длине волны 0.5 мкм, а переизлученная на 10 мкм.

Зная значение солнечной постоянной  $\eta$  (удельный поток мощности солнечного излучения на границе земной атмосферы) и площадь центрального сечения земного шара  $S$ , получим значение падающего на планету потока энергии:  $W = \eta S$ . Часть его,  $W_{ref} = A\eta S$ , отражается земным шаром, а часть,  $W_{abs} = (1 - A)\eta S$ , поглощается. Строго говоря, до наблюдателя приходит отраженный поток не от всей площади  $S$  планеты, а только от геометрически доступной из точки наблю-

дения ее части. Доля доступной для наблюдения поверхности планеты определяется ее фазой. Она, подобно фазам Луны, зависит от взаимного расположения планеты, звезды и точки наблюдения. В настоящей работе предполагалось, что фаза является полной, и если это не так, то результат необходимо корректировать для каждого конкретного случая.

За счет поглощенной планетой энергии происходит ее разогрев, и она переизлучает поглощенную часть мощности в инфракрасном диапазоне. Если это планета земного типа, имеющая период вращения вокруг оси порядка земных суток и защищенная атмосферой, то температуры на дневной и ночной сторонах приблизительно одинаковы, и для нее, как для всякого самосвещающегося тела, фазовые зависимости в инфракрасном диапазоне отсутствуют.

Используя известное из квантовой механики выражение для представления зависимости энергии кванта  $E$  (в джоулях) от длины волны  $\lambda$  :

$$E = \frac{ch}{\lambda},$$

где  $c$  – скорость света,  $h$  – постоянная Планка, можем перейти к количеству квантов. Общий поток отражаемых Землей квантов в секунду  $N_{ref}$  равен

$$N_{ref} = \frac{A\eta\pi b^2}{ch}\lambda,$$

где  $b$  – радиус Земли. Для количественных оценок в дальнейшем будем считать, что  $A = 0.39$  (как у Земли).

На телескоп наблюдателя, который удален на расстояние  $R_{ref}$  и имеет площадь  $d^2$  квадратных метров за  $\tau$  секунд придет  $n_{ref}$  отраженных от планеты фотонов:

$$n_{ref} = \frac{A\eta\pi b^2}{ch}\lambda \frac{d^2\tau}{2\pi R_{ref}^2}.$$

Из этого соотношения можно получить два решения относительно  $R_{ref}$ . Физический смысл имеет одно из них, а именно:

$$R_{ref} = K_{ref} d \sqrt{\lambda \tau}. \quad (3)$$

Если  $\lambda$  выразить в микрометрах, а через  $L$  обозначить длину светового года в метрах, то

$$K_{ref} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{A\eta b^2}{2 \cdot 10^6 n_{ref} ch}}$$

и  $R_{ref}$  будет выражено в световых годах, что облегчает восприятие в графическом представлении.

Таким образом, максимально достижимая предельная дальность планеты, обусловленная ограничениями со стороны мощности светового потока, линейно зависит от размеров телескопа и как корень квадратный из произведения длины рабочей волны на продолжительность экспозиции. Формула (3) получена для квадратной заполненной апертуры. Для случая разреженной и/или апертуры другой формы необходимо заменить  $d^2$  на общую площадь.

Для переизлученной энергии численный коэффициент будет другой. Это связано с действием двух факторов. Во-первых, как мы уже отмечали, при альбедо, равном  $A$ , поглощенная энергия составляет  $(1-A)$  от общей падающей на планету энергии. Во-вторых, вся поглощенная энергия переизлучается в инфракрасном диапазоне, но, в отличие от отраженной, не в полусферу ( $2\pi$  стерадиан), а в полную сферу ( $4\pi$  стерадиан). Это утверждение справедливо для всех небесных тел с небольшой разницей дневной и ночной температур. С учетом этого общий поток переизлучаемых Землей квантов в секунду  $N_{abs}$  равен:

$$N_{abs} = \frac{(1-A)\eta\pi b^2}{ch}\lambda.$$

На телескоп наблюдателя, который удален на расстояние  $R_{abs}$  и имеет площадь  $d^2$  квадратных метров за  $\tau$  секунд придет  $n_{abs}$  переизлученных планетой фотонов:

$$n_{abs} = \frac{(1-A)\eta\pi b^2}{ch}\lambda \frac{d^2\tau}{4\pi R_{abs}^2}.$$

Из этого соотношения можно получить следующее имеющее физический смысл решение относительно  $R_{abs}$  :

$$R_{abs} = K_{abs} d \sqrt{\lambda \tau}, \quad (4)$$

где

$$K_{abs} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{(1-A)\eta b^2}{4 \cdot 10^6 n_{abs} ch}}.$$

Зависимости (2), (3), (4) от длины волны для десятиметрового телескопа при экспозиции 100 с представлены на рис. 1. При этих условиях для обеспечения точности 10 % достаточно регистрировать более одного кванта в секунду.

Подставив в (3) значения всех констант, для десятиметрового телескопа на длине волны 0.5 мкм получим предельно допустимое расстояние, отмеченное квадратиком на рис. 1 (173.6 св. года).

Вычисленное из выражения (4) предельное расстояние для телескопа такого же размера, работающего в инфракрасной области (10 мкм), составляет 686.6 св. года. На рис. 1 эта точка отмечена крестиком на штриховой линии 2.

Эти результаты иллюстрируют фотометрические показатели десятиметрового телескопа в видимой и инфракрасной областях. Используя выражение (2), можно сопоставить их с дифракционными показателями такого же телескопа, представленными на рисунке сплошной линией. На этой линии отмечены две точки: кружком – предельная дальность для видимой части спектра (317.1 св. года), и значком ромбик – для инфракрасной (15.9 св. года).

Сопоставление этих данных свидетельствует о том, что при наблюдениях в видимом диапазоне лимитирующим фактором для дальности обнаружения является светособирающая способность телескопа, а в инфракрасном – его разре-

шающая способность. Этот вывод можно подтвердить аналитически, разделив  $R_{abs}$  на  $R_r$ :

$$\frac{R_{abs}}{R_r} \sim \lambda^{3/2}.$$

Таким образом, для рассматриваемой задачи отношение светособирающей к разрешающей способности телескопов со сплошной апертурой не зависит от диаметра инструмента и увеличивается пропорционально длине волны в степени 3/2. Если центральная звезда имеет температуру отличную от солнечной, то в соответствии с законом смещения Вина максимум ее излучения должен сместиться и полученные численные значения будут другими. Но при этом общие закономерности, отраженные на рис. 1, сохраняются.

Недостаток разрешающей способности инфракрасных телескопов можно компенсировать применением разреженной апертуры, как это часто делается в радиодиапазоне [3, 4].

Создание телескопов с разреженной апертурой в инфракрасном диапазоне выгодно по нескольким причинам. Во-первых, в случае космического базирования телескопа изготовление и доставка на орбиту нескольких малых зеркал гораздо проще и дешевле, чем одного большого зеркала эквивалентного размера. Во-вторых, требования к соблюдению точности поверхностей зеркал в инфракрасном диапазоне снижаются с увеличением длины волны. В-третьих, отношение светового потока от звезды к потоку от планеты в инфракрасном диапазоне на три порядка меньше, чем в видимом. Так, в приближении закона Релея–Джинса Солнце на длине волны  $\lambda = 10$  мкм излучает в 400 раз меньше, чем на  $\lambda = 0.5$  мкм (если считать Солнце абсолютно черным телом). Вследствие этого мощные “боковые лепестки” звездного изображения в меньшей мере маскируют изображение планеты. Это обстоятельство более подробно рассматривается в третьем параграфе настоящей статьи.

Полученные результаты свидетельствуют о преимуществе использования инфракрасного диапазона перед видимым для обеспечения максимальной светособирающей способности и, как следствие, дальности обнаружения экзопланет. Недостаток разрешающей способности инфракрасного телескопа гораздо легче компенсировать применением разреженной апертуры, нежели недостаток светособирающей увеличением площади зеркал. Увеличение

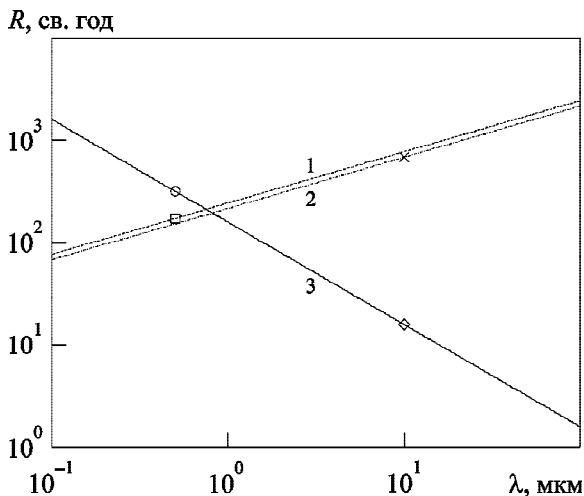


Рис. 1. Зависимость предельной дальности обнаружения планеты земного типа от длины волны для десятиметрового телескопа при экспозиции 100 с. Штриховой линией 1 представлена величина  $R_{ref}$ , штриховой линией 2 – величина  $R_{abs}$ , сплошной линией 3 – величина  $R_r$ .

площади зеркал удорожает их доставку на орбиту, а для увеличения разрешающей способности посредством перехода на разреженную апертуру можно использовать бесплатное космическое пространство. Особенно в случае телескопа без жесткой связи компонентов.

### 3. Дифракционное размытие

Специфичным источником помех в рамках задачи обнаружения экзопланет является центральное светило, светимость которого в видимом диапазоне, как правило, превышает светимость планеты на 9 и больше порядков. Как было отмечено в предыдущем разделе, отраженный планетой и рассеянный в космическом пространстве световой поток равен  $W_{ref} = A\eta S$ . В численном выражении для Земли он равен  $6.83 \cdot 10^{16}$  Вт. Согласно справочным данным [5] светимость Солнца равна  $3.85 \cdot 10^{26}$  Вт. Если использовать эти численные значения, а также учесть, что Солнце излучает в сферу ( $4\pi$  стерадиан), а Земля – в полу-сферу ( $2\pi$  стерадиан), то отношение светового потока от Солнца к потоку от Земли для удаленного наблюдателя будет составлять  $2.8 \cdot 10^9$  раз. При неблагоприятной фазе планеты это соотношение может возрасти. Как мы отмечали ранее, для инфракрасного диапазона превышение составляет около шести порядков. Хотя эти помехи не являются принципиально неустранимыми, бороться с ними очень трудно.

Интенсивность паразитной подсветки от центральной звезды зависит от аппаратной функции телескопа, состоящей из центрального максимума и “боковых лепестков” в виде системы чередующихся темных и светлых колец, если апертура круглая. На фоне сравнительно яркого дифракционно размытого изображения центрального светила трудно увидеть слабое изображение планеты.

Для борьбы с этим явлением на пути распространения света устанавливают амплитудные и фазовые маски, используют интерференционные методы и аподизацию объектива [6–8]. В указанных работах речь идет в основном о телескопах со сплошной апертурой. Рассмотрим возможные средства борьбы с дифракционным размытием при применении разреженной апертуры. Для простоты и наглядности ограничимся одномерным случаем.

Пусть зеркало телескопа имеет размер  $d$ . Центральное сечение аппаратной функции телескопа с таким зеркалом представлено на рис. 2 штрих-пунктирной линией. Как мы показали ранее, телескоп инфракрасного диапазона с таким разрешением не может в полной мере реализовать его проникающую силу. Поэтому заменим зеркало на два, разместив их на расстоянии  $a = md$ , где  $m > 1$  – коэффициент разрежения апертуры. Аппаратная функция такого двухэлементного телескопа, вернее ее центральное сечение, для  $m = 4$  изображена на рис. 2 штриховой

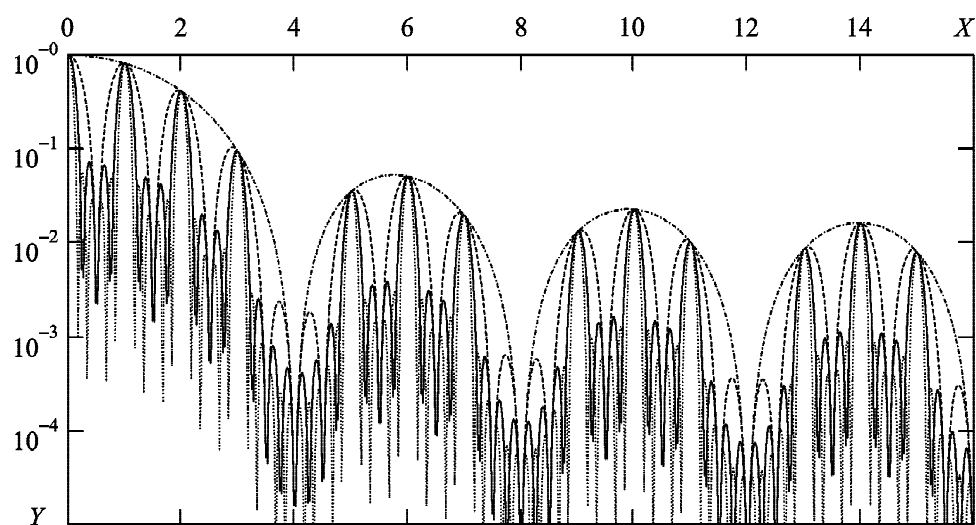


Рис. 2. Аппаратные функции телескопов с апертурой без аподизации (ось  $Y$ ): штрих-пунктирная линия – сплошная апертура, штриховая линия – двухэлементная апертура, сплошная линия – четырёхэлементная апертура, пунктирная линия – шестиэлементная апертура;  $X$  – порядковый номер бокового лепестка

линией. На месте одного широкого центрального максимума нулевого порядка получим много дифракционных лучей первого, второго и т. д. порядков. При увеличении количества субапертур эти дифракционные лучи сужаются, и между ними появляются мелкие локальные максимумы, которые создают некоторый фон, уровень которого уменьшается с возрастанием количества субапертур. На рис. 2 сплошной линией изображен результат интерференции от четырех, а пунктирной линией – от шести субапертур одинакового размера. Из него следует, что с увеличением числа компонентов зеркала уровень фона между боковыми максимумами, а также ширина центрального и больших боковых максимумов уменьшается, а уровень фона между ними падает.

Этой закономерностью пользуются спектроскописты при изготовлении дифракционных решеток. Но телескоп не может содержать столько компонентов, сколько штрихов у дифракционной решетки, поэтому необходимо искать другие способы подавления мешающего фона.

Это несколько иная проблема, чем боковая засветка фоном неба при радиоастрономических наблюдениях. Для борьбы с этим явлением радиоастрономы формируют аппаратную функцию в виде одиночного пика с минимальной общей энергией боковых лепестков и минимальным уровнем наибольшего бокового лепестка [9, 10]. При наблюдении звездного поля в оптическом диапазоне в подавляющем большинстве случаев угловое расстояние между объектами наблюдения значительно превосходит радиус кружка Эйри, который определяет разрешающую силу телескопа (1). По этой причине астрометристы, которые определяют координаты звезд, мало беспокоит наличие боковых лепестков и их уровень.

Специфика нашей задачи также допускает применение многолепестковой диаграммы направленности. Для нас решающее значение имеет не столько уровень максимальных значений боковых лепестков аппаратной функции, сколько достаточная глубина минимумов между ними. В большинстве случаев она должна составлять минус 6–9 порядков от нулевого максимума. Для удовлетворения этого требования мы исследовали возможности аподизации объектива с разреженной апертурой.

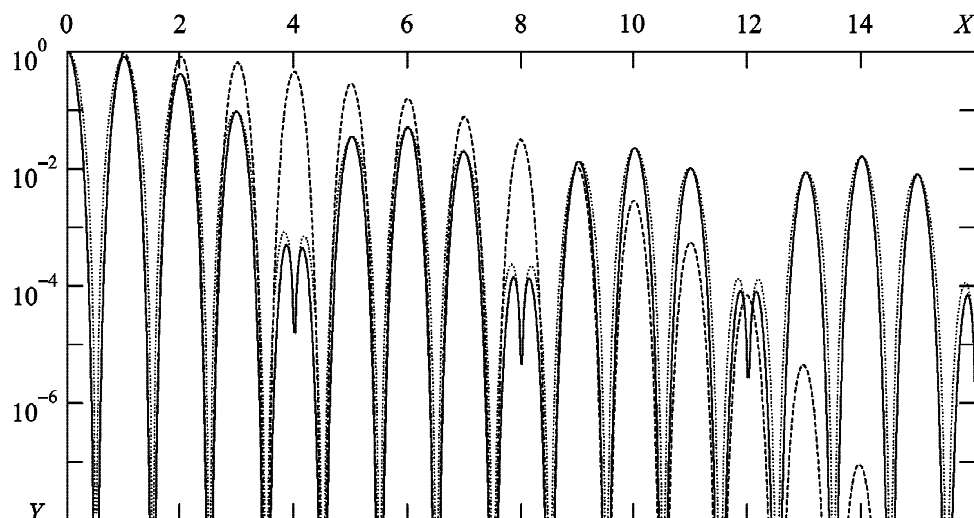
Для вычисления аподизирующей функции использовался метод восхождения на вершину

[11–13]. Оптимизирующим параметром принято отношение амплитудного значения центрального максимума аппаратной функции к усредненному уровню фона между нулевым и первым порядком дифракционной структуры аппаратной функции. Такой алгоритм приводит к аподизации с использованием биномиальных коэффициентов, применение которых для формирования диаграммы направленности радиотелескопа описано Дж. Д. Краусом в [3, 10].

Результаты применения такого способа аподизации для одномерной апертуры представлены на рис. 3. Для четырехэлементной апертуры пропускание парциальных элементов составляет 1:3:3:1, а для шестиэлементной 1:5:10:10:5:1. Центральное сечение аппаратной функции для этих случаев представлено в логарифмическом масштабе на рис. 3 пунктирной и сплошной линиями соответственно.

Из рис. 3 следует, что увеличение количества парциальных апертур уменьшает ширину главного и вторичных максимумов в такой же степени, как и в случае отсутствия аподизации. Но при этом уровень фона в промежутках между вторичными максимумами становится на несколько порядков меньше, что имеет решающее значение для задачи обнаружения слабых точечных источников на фоне мощной дифракционной засветки от центральной звезды. Большое количество боковых лепестков не является принципиальным недостатком, т. к. отношение площади светлых участков дифракционной картины к площади темных ее частей для почти периодической структуры не зависит от количества периодов.

Но с большим количеством вторичных максимумов, как для всякого интерферометра, связана малая величина рабочего спектрального диапазона, обусловленная разным масштабом интерферометрической картины для разных длин волн (хроматический эффект). Этот недостаток не является принципиальным, потому что существуют схемотехнические способы его преодоления. Эта задача может быть решена, например, введением в определенное место оптического тракта диспергирующего элемента с дисперсией, направленной ортогонально к угловому разрешению. Примером такой оптической схемы является телескоп с объективной призмой. Особенно легко, в смысле топологии, реализовать такую схему



**Рис. 3.** Центральные сечения аппаратной функции с аподизацией по биномиальному закону (ось  $Y$ ) для четырехэлементной (пунктирная линия) и шестиэлементной (сплошная линия) апертур. Штриховая линия иллюстрирует применение рекурсии;  $X$  — порядковый номер бокового лепестка

для одномерной апертуры. В этом случае дисперсия направлена перпендикулярно оси телескопа. Возможен вариант, когда направление дисперсии совпадает с осью телескопа. Это свойство всех телескопов-рефракторов называется хроматической аберрацией. Она всегда считалась самым большим недостатком линзовой оптики. Ее можно преобразовать в достоинство, если использовать специальные детекторные матрицы.

Традиционно считается, что линзовая оптика массивнее зеркальной. Но в случае отсутствия жесткой связи между объективом телескопа и его фокальной плоскостью космический инструмент может иметь произвольно большое фокусное расстояние. Линзовый объектив длиннофокусного телескопа может иметь толщину порядка миллиметра даже при больших диаметрах. Он может состоять из фрагментов и быть легче зеркального, но, как всякий рефрактор, будет менее чувствителен к температурным и иным деформациям.

Для уменьшения количества вторичных максимумов мы предлагаем применить рекурсивную процедуру аподизации парциальных апертур. Идея рекурсивного подхода состоит в том, что аподизации подвергается не только общая, но и парциальные апертуры телескопа. При таком подходе получаем зависимость, которая отображена на рис. 3 штриховой линией. Из нее следует, что различие между уровнями 14-го бокового

лепестка с использованием рекурсии и без нее составляет около пяти порядков. Теоретически это различие может быть увеличено как подбором закона аподизации парциальных апертур, так и увеличением количества уровней рекурсии. Поэтому если аподизировать не только объектив в целом, но и каждую парциальную апертуру в отдельности, то количество боковых лепестков можно несколько уменьшить.

Положительной особенностью подавления дифракционного размытия аподизацией объектива по сравнению с использованием разного рода масок и применением интерференционного обнуления в фокальной плоскости является в первую очередь широкоугольность. Аподизация не требует изготовления каких-либо приспособлений для каждой наблюдаемой звезды, а работает единообразно для всех звезд в безабберационном поле телескопа. Мы не анализировали детально роль паразитных инструментальных подсветок, но из общих соображений борьба с ними упрощается при увеличении фокусного расстояния инструмента и с уменьшением его светосилы.

#### 4. Выводы

1. Анализ разрешающей и светособирающей способностей телескопов показал, что по этим показателям для решения задачи прямого обнаружения экзопланет земного типа в видимом диапазоне заполненная апертура не является сбалансиро-



ванной. Она имеет недостаточную светособирающую способность по сравнению с разрешающей.

2. В инфракрасном диапазоне ситуация обратная: телескоп с полностью заполненной квадратной или круглой апертурой имеет избыток светособирающей способности. Происходит это потому, что с увеличением длины рабочей волны телескопа разрешение падает и увеличивается (при прочих равных условиях) количество квантов в единице энергии. Это свидетельствует о целесообразности перехода на разреженную апертуру в инфракрасном диапазоне, что открывает перспективу значительного облегчения и удешевления телескопов. Хотя как разрешающей, так и светособирающей способности никогда не бывает слишком много, но разумный компромисс в вопросе степени заполнения апертуры необходимо находить всякий раз, исходя из условий решаемой задачи.

3. С иллюстративными целями представлен вариант расчета аподизации для некоторого частного случая. Предлагается строить телескоп из такого набора парциальных апертур, который позволяет реализовать рассчитанный закон аподизации. Обсуждаются меры борьбы с хроматическим эффектом при большом поле зрения.

Авторы благодарны доценту кафедры астрономии и космической информатики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина Д. Г. Станкевичу за полезные предложения и критические замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Armstrong S. and Sandberg A.* Eternity in six hours: Intergalactic spreading of intelligent life and sharpening the Fermi paradox // *Acta Astronaut.* – 2013. – Vol. 89. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.04.002
2. *Francis T. S. Yu.* Introduction to Diffraction, Information Processing, and Holography. – Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1973. – 384 p.
3. *Kraus J. D.* Radioastronomy. – New York: MakGrau-Hill, 1966. – 456 p.
4. *Христиансен У., Хегбом И.* Радиотелескопы. – М.: Мир, 1988. – 304 с.
5. *Patrick Moore's Data Book of Astronomy. P. Moore and R. Rees, eds.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 576 p.
6. *Kuchner M. J. and Traub W. A.* A coronagraph with a band-limited mask for finding terrestrial planets // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 570, No. 2. – P. 900–908. DOI: 10.1086/339625
7. *Watson S. M., Mills J. P., Gaiser S. L., and Diner D. J.* Direct imaging of nonsolar planets with infrared telescopes using apodised coronagraphs // *Appl. Opt.* – Vol. 30, No. 22. – P. 3253–3262. DOI: 10.1364/AO.30.003253
8. *Guyon O., Pluzhnik E. A., Kuchner M. J., Collins B., and Ridgway S. T.* Theoretical Limits on Extrasolar Terrestrial Planet Detection with Coronagraphs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2006. – Vol. 167, No. 1. – P. 81–99. DOI: 10.1086/507630
9. *Л. Г. Содин.* Некоторые проблемы теории фазированных антенных решеток, актуальные для радиоастрономии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, Спецвыпуск. – С. 128–142.
10. *Kraus J. D.* Antennas. – New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., 2001. – 892 p.
11. Адаптивная оптика: Сб. статей / Пер. с англ. Под ред. Э. А. Витриченко. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
12. *Ф. П. Васильев.* Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980 – 552 с.
13. Космическая оптика. Труды IX Международного конгресса Международной комиссии по оптике. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

## REFERENCES

1. ARMSTRONG, S. and SANDBERG, A., 2013. Eternity in six hours: Intergalactic spreading of intelligent life and sharpening the Fermi paradox. *Acta Astronaut.* vol. 89, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.04.002
2. FRANCIS, T. S. Yu., 1973. *Introduction to Diffraction, Information Processing, and Holography.* Cambridge, Mass.: The MIT Press
3. KRAUS, J. D., 1966. *Radioastronomy.* New York: MakGrau-Hill.
4. CHRISTIANSEN, W. W. and HOGBOM, J. A., 1969. *Radioteleskopes.* Cambridge: Cambridge University Press.
5. MOORE, P. and REES, R., eds. 2011. *Patrick Moore's Data Book of Astronomy.* Cambridge: Cambridge University Press.
6. KUCHNER, M. J. and TRAUB, W. A., 2002. A coronagraph with a band-limited mask for finding terrestrial planets. *Astrophys. J.* vol. 570, no. 2, pp. 900–908. DOI: 10.1086/339625
7. WATSON, S. M., MILLS, J. P., GAISER, S. L. and DINER, D. J., 1991. Direct imaging of nonsolar planets with infrared telescopes using apodised coronagraphs. *Appl. Opt.* vol. 30, no 22, pp. 3253–3262. DOI: 10.1364/AO.30.003253
8. GUYON, O., PLUZHNIK, E. A., KUCHNER, M. J., COLLINS, B. and RIDGWAY, S. T., 2006. Theoretical Limits on Extrasolar Terrestrial Planet Detection with Coronagraphs. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* vol. 167, no. 1, pp. 81–99. DOI: 10.1086/507630
9. SODIN, L. G., 2005. Some Problems of the Phased Array Theory Relevant in Radio Astronomy. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 10, special is., pp. 128–142 (in Russian).
10. KRAUS, J. D., 2001. *Antennas.* New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd.
11. 1980. *Adaptive optics, collected writings.* Moscow: Mir Publ. (in Russian).

12. VASIL'EV, F. P., 1980. *Numerical methods for solving extreme problems*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
13. THOMPSON, B. J. and SHANNON, R. R., eds. 1974. *Space Optics: Proceedins of the ninth international congress of the international commission for optics (ico IX)*. Washington, D.C.: National Academies of Sciences.

A. D. Yegorov, V. A. Yegorov, S. A. Yegorov,  
L. I. Yelenskaya, and I. Ye. Sinel'nikov

A. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

#### VISIBLE AND INFRARED TELESCOPES IN DETECTION OF EARTH-LIKE EXOPLANETS

*Object and purpose:* The study examines the balance of resolving and light-harvesting (penetrating) abilities of filled and sparse aperture telescopes in direct detection of terrestrial exoplanets. We assess the role of quantum fluctuations of luminous flux in optical and infrared bands. Studied are the ways to deal with diffraction spreading of sparse aperture under conditions of high luminosity contrast between a star and a planet.

*Methods and methodology:* Resolution problem is considered in the Fraunhofer approximation. In the one-dimensional version, we present the method of synthesis of an apodizing function of a sparse aperture telescope by means of the "hill climbing" algorithm. We also investigate the effectiveness of a recursive approach in forming an apodizing function for the partial sub-apertures.

*Findings:* Our study offers estimations of the maximum range in the direct detection of terrestrial exoplanets, which were obtained through observations in visible and infrared bands, and its dependence on wavelength and aperture size. They indicate the lack of balance in the light-harvesting and resolving abilities of telescopes with filled aperture in different spectral bands, taking into account the quantum fluctuations of luminous flux. The proposed solution is to implement a balanced resolving and light-collecting ability of telescopes with sparse aperture. Optical schemes which allow to eliminate chromatic effect during interferometric observations in survey mode are suggested.

*Conclusions:* Switch-over to the infrared range while using sparse aperture improves the balance and reduces the contrast of the central star and the planet. To reduce the diffraction spreading of a telescope with sparse aperture we offer apodization with a recursive use of the binomial coefficients not only for the lens as a whole but for the partial sub-apertures as well. The advantages of a long-focus and low optical power scheme are also specified.

*Key words:* exoplanets, balance of resolving and light-harvesting abilities of telescopes, apodizing function

А. Д. Єгоров, В. А. Єгоров, С. А. Єгоров,  
Л. І. Єленська, І. Є. Сінельніков

Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усікова НАН України,  
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

#### ТЕЛЕСКОПИ ВИДИМОГО ТА ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЕКЗОПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПУ

*Предмет і мета роботи:* Досліджується баланс роздільної і світлозбираючої (проникаючої) здатностей телескопів при прямому виявленні екзопланет земного типу для телескопів з суцільною та розрідженою апертурою. Оцінюється роль квантових флуктуацій світлового потоку у видимому та інфрачервоному діапазонах. Вивчаються способи боротьби з дифракційним розсіянням розрідженої апертури в умовах великого світлового контрасту зірки відносно планети. *Методи і методологія:* Проблема роздільної здатності розглядається в наближенні Фраунгофера. В одновимірному варіанті аналізується спосіб синтезу аподізуючої функції телескопа з розрідженою апертурою за допомогою алгоритму "сходження на вершину". Досліджується ефективність рекурсивного підходу у формуванні аподізуючої функції для парціальних субапертур.

*Результати роботи:* Отримано залежності максимальної дальності виявлення екзопланет земного типу прямими спостереженнями у видимому та інфрачервоному діапазонах від довжини хвилі та розміру апертури. Вони свідчать про відсутність збалансованості світлозбираючої і роздільної здатностей телескопів із суцільною апертурою для різних спектральних діапазонів при урахуванні квантових флуктуацій світлового потоку. Пропонується здійснювати балансування роздільної і світлозбираючої здатностей телескопів шляхом використання розрідженої апертури. Пропонуються оптичні схеми для боротьби з хроматичним ефектом у оглядових інтерферометричних спостереженнях.

*Висновок:* Перехід в інфрачервоний діапазон з використанням розрідженої апертури покращує ступінь збалансованості та зменшує контраст центральної зірки відносно планети. Для боротьби зі збільшеним дифракційним розмиттям зображень в телескопі з розрідженою апертурою пропонується аподизація з рекурсивним використанням біноміальних коефіцієнтів не лише для об'єктива в цілому, але й для парціальних субапертур. Відзначаються переваги довгофокусної малосвітлосильної оптичної схеми.

*Ключові слова:* екзопланети, баланс роздільної і світлозбираючої здатностей телескопів, аподізуюча функція

Стаття постуила в редакцію 20.09.2015