

Критерий осуществимости межзвездной лазерной связи и условия ее оптимизации при адресном поиске и посыле сигналов

С.К.Манкевич, Е.П.Орлов

На основе возможностей, появившихся с созданием больших оптических телескопов, лазерного приемного устройства с иодным активным квантовым фильтром, мощных высокоэнергетических иодных лазеров с дифракционной расходимостью излучения, а также с открытием экзопланет земного типа, в том числе и находящихся сравнительно недалеко от Солнца, проведен анализ осуществимости межзвездной лазерной связи в условиях, когда центральное пятно дифракционной картины в месте приема лазерного сигнала с помощью крупногабаритных оптических телескопов может быть сделано меньше орбиты планеты, а сигналы приходят в заданную точку орбиты не синхронно с планетой из-за погрешности определения расстояния между Солнцем и звездой, вокруг которой обращается выбранная для связи планета.

Ключевые слова: межзвездная лазерная связь, крупногабаритные оптические телескопы, экзопланеты, внеземные цивилизации, иодный лазер, активный квантовый фильтр.

1. Введение

В настоящее время продолжается интенсивный поиск экзопланет [1] и уже выявлены планеты земного типа, на которых, в принципе, может существовать жизнь, в том числе, возможно, и разумная. В связи с этим в программах SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) [2], METI (Message for Extraterrestrial Intelligence) [3], а в перспективе и в CETI (Communication with Extraterrestrial Intelligence) все более актуальным становится «адресный» поиск сигналов внеземных цивилизаций (ВЦ), т. е. поиск сигналов в излучении именно тех звезд, у которых обнаружены экзопланеты земного типа. Отметим, что далее везде без оговорок предполагается, что если на какой-то экзопланете и существует ВЦ, то уровень ее технического развития не ниже, чем земной цивилизации.

Поскольку созданы крупногабаритные 10-метровые оптические телескопы, в которых благодаря применению адаптивных оптических систем преодолен атмосферный барьер разрешения [4], а также разработано много мощных высокоэнергетических лазеров [5], электромагнитные волны оптического диапазона представляются наиболее подходящими для решения задачи адресного поиска. Интерес к поиску сигналов ВЦ в оптическом диапазоне после подъема, связанного с проектом «МАНИЯ» (многоканальный анализ наносекундных изменений яркости) [6], и последовавшего затем спада вновь начал возрождаться. По мнению Джеффри Марси, известного астронома, принимавшего участие в открытии 110 экзопланет, включая первую обнаруженную систему, и возглавившего несколько

лет назад институт SETI, требуется реорганизация поисков ВЦ. В первую очередь речь идет о развороте к оптическому диапазону длин волн [7]. Об этом свидетельствуют и совсем недавние работы [8, 9].

Отметим, что в работах [10–16] было показано, какие огромные возможности открывают иодные фотодиссоционные лазеры при решении задач, связанных как с поиском сигналов ВЦ, так и с посылкой сигналов им. Это обусловлено тем, что, во-первых, на базе иодного фотодиссоционного усилителя (длина волны $\lambda = 1.315$ мкм) создан узкополосный активный квантовый фильтр (АКФ) с жестко фиксированной по положению в спектре линией усиления шириной менее 0.01 см^{-1} (разрешение $\lambda/\Delta\lambda > 7.6 \times 10^5$) и квантовым пределом чувствительности [17], способный принимать, выделять и регистрировать лазерные сигналы, состоящие всего из нескольких фотонов, на фоне излучения исследуемой звезды [18]. Во-вторых, на $\lambda = 1.315$ мкм созданы мощные наносекундные иодные лазеры с дифракционной расходимостью излучения и энергией более 2 кДж [5]. Перестройка спектра излучения этих лазеров в пределах нескольких обратных сантиметров с помощью магнитного поля [19] позволяет компенсировать доплеровские сдвиги частоты при относительном движении вдоль одной линии приемника и передатчика со скоростью, превышающей 200 км/с. В-третьих, излучение с $\lambda = 1.315$ мкм попадает в окно прозрачности атмосферы и может приниматься наземными оптическими телескопами.

Рассмотрение осуществимости межзвездной лазерной связи в [10–16] и в более ранних работах [20–24] основывалось на предположении, что в месте приема центр дифракционной картины (ДК) посылаемого сигнала совпадает с приемным устройством. Это предположение оправдано в том случае, когда центральное пятно ДК много больше размера орбиты планеты. В радиодиапазоне длин волн это всегда реализуется.

В оптическом диапазоне при исследовании звезд с помощью крупногабаритных оптических телескопов иногда удастся непосредственно увидеть и вращающиеся во-

С.К.Манкевич. ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов “Астрофизика”», Россия, 125424 Москва, Волоколамское ш., 95

Е.П.Орлов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: eorlov@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 18 декабря 2015 г., после доработки – 4 мая 2016 г.

круг них экзопланеты. Так, например, первое прямое фото экзопланеты (рядом со звездой 2M1207 в созвездии Центавра) получено на 8-метровом телескопе VLT еще в 2004 г. [4]. А в 2014 г. началось строительство телескопа E-ELT с диаметром главного зеркала почти 40 м [25]. Основной задачей коллектива обсерватории E-ELT станет детальное исследование открытых к настоящему времени экзопланет и поиск новых. Разрабатывается также телескоп OWL (Over Whelmingly Large Telescope – ошеломляюще большой телескоп) с диаметром главного зеркала 100 м [26].

Все это означает, что при посыле с помощью таких телескопов лазерных сигналов к экзопланетам, особенно к тем, которые находятся сравнительно недалеко от Солнца, или при посыле сигналов в сторону Земли обитающими на них ВЦ диаметр ДК в месте приема может оказаться сравнимым по размерам с орбитой планеты, на которой размещено приемное устройство, или даже меньше нее. И хотя вопросы, которые при этом возникают, поднимались уже давно (см. [2]), в ответах на них не учитывалась неопределенность положения планеты в момент прихода сигнала в заданную область орбиты, обусловленная погрешностью определения межзвездных расстояний. Поэтому рассматривавшиеся ранее критерии осуществимости межзвездной связи, базирующиеся на предположении, что приемник находится в центре ДК, не подходят для ответа на практически важные вопросы, касающиеся параметров прямо-передающих устройств. Цель настоящей работы – найти критерий осуществимости межзвездной лазерной связи в описанных выше условиях.

2. Исходные соотношения

Пусть ВЦ излучает на длине волны λ в направлении Солнца (или наша цивилизация излучает в направлении звезды с подходящей для жизни экзопланетой) лазерный пучок с плоским волновым фронтом кругового сечения диаметром D_b , с энергией в каждом импульсе E , однородно распределенной по сечению пучка. Такой пучок в дальней зоне образует ДК, сила излучения в которой описывается широко известной формулой Эйри [27]. Для наших целей запишем ее в виде

$$I(r) = \frac{ER^2}{4\pi r_0^2} \left(2 \frac{J_1(r/r_0)}{r/r_0} \right)^2, \quad (1)$$

где $r_0 = \lambda R/\pi D_b$; R – расстояние от передатчика; $r \ll R$ – расстояние от центра ДК до приемника; $J_1(x)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Как говорилось во Введении, рассмотрение, проводившееся в предшествующих работах, основывалось на предположении, что центральное пятно ДК на межзвездных расстояниях много больше орбиты планеты. Тогда если сигнал посылается в направлении Солнца или звезды с предполагаемой ВЦ, можно считать, что планета с приемником находится практически в центре ДК. Поэтому $J_1(x)$ можно разложить в ряд Тейлора и ограничиться первым членом разложения. При этом сила излучения в точке приема выражается формулой $I(r) = EA_b/\lambda^2$ (где $A_b = \pi D_b^2/4$ – площадь поперечного сечения пучка), а принимаемая энергия при площади апертуры приемника A_r – формулой $E_r = I(r)A_r/R^2 = EA_bA_r/(\lambda^2 R^2)$, фигурирующей в перечисленных выше работах [10–16, 20–24].

В случае же, когда планета с приемником удалены от центра ДК настолько, что уже нельзя ограничиться линейным членом в разложении $J_1(x)$ в ряд Тейлора, тогда принимаемую энергию с учетом пропускания атмосферы Земли T_E и атмосферы экзопланеты T_c при круговой апертуре принимающего телескопа диаметром D_r следует описывать формулой

$$E_r = I(r)A_r/R^2 = ET_ET_c(D_r/2r)^2 J_1^2(D_b/D_0), \quad (2)$$

где $D_b/D_0 \equiv r/r_0$, а $D_0 = \lambda R/\pi r$. Если λ и D_0 выразить в метрах, R в парсеках (пк), а r – в астрономических единицах (а.е.), то $D_0 = 8.63 \times 10^{-2} R/r$. Из формулы (2) с учетом свойств $J_1(x)$ видно, что при увеличении D_b от нуля E_r сначала возрастает, затем уменьшается до нуля и далее испытывает затухающие колебания, проходя максимальные и нулевые значения. С практической точки зрения интересна область значений аргумента функции $J_1(x)$ вблизи первого, самого большого, ее максимума, т.е. в интервале $0 \leq x \leq 3.83$. Значение $x = x_0 \approx 3.83$ соответствует первому темному кольцу ДК, максимальное же значение $J_1(x)$ достигается при $x = x_m = 1.84$.

3. Критерий осуществимости межзвездной лазерной связи

Если для регистрации сигнала, попавшего в апертуру телескопа, используется приемное устройство с чувствительностью S_μ , представляющей собой ту минимальную энергию, которую может зарегистрировать приемник при отношении сигнал/шум, равном μ , с вероятностью, не меньшей, чем $1 - \mu^{-2}$, то необходимо, чтобы $E_r \geq S_\mu$. Отсюда с учетом (2) получаем критерий осуществимости межзвездной лазерной связи, когда размеры центрального пятна ДК и орбиты планеты соотносятся произвольным образом, а сама планета находится на расстоянии r от центра ДК:

$$\frac{D_r \sqrt{ET_ET_c}}{r} \geq \frac{2\sqrt{S_\mu}}{J_1(D_b/D_0)}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что лазерное приемное устройство с иодным АКФ при $\mu = 3$ имеет чувствительность $S_\mu = 3\hbar\omega = 4.53 \times 10^{-19}$ Дж, где $\hbar\omega = 1.51 \times 10^{-19}$ Дж – энергия кванта лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1.315$ мкм, и выражая r в астрономических единицах, E в джоулях, а D_r в метрах, преобразуем этот критерий к более удобному для использования виду

$$\frac{D_r \sqrt{ET_ET_c}}{r} \geq \frac{201}{J_1(D_b/D_0)}. \quad (4)$$

Из рис.1. видно, что при увеличении диаметра пучка от нуля выполнение критерия облегчается, т.к. правая часть (4) уменьшается и проходит через минимум при $D_b/D_0 = x_m \approx 1.84$.

4. Оптимальный режим межзвездной лазерной связи

В точке, где достигается минимум правой части (4), критерии (3) и (4) распадаются на два условия. Первое условие

$$D_b \approx 0.159R/r \quad (5)$$

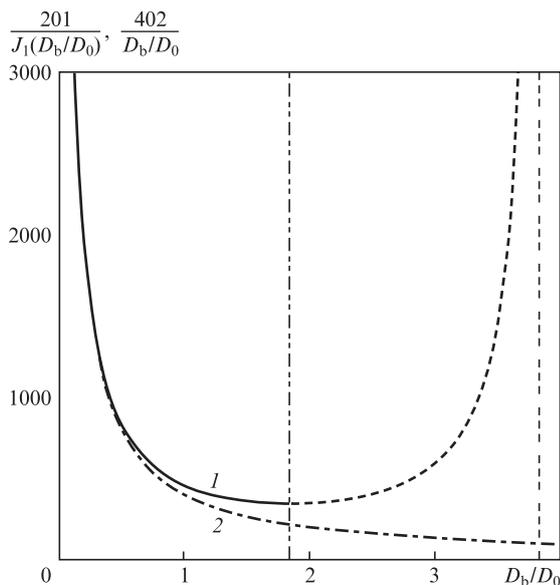


Рис.1. Зависимость правой части критерия (4) от отношения D_b/D_0 (1), а также аппроксимация правой части (4) в предположении, что центральное пятно ДК много больше орбиты планеты, $402/(D_b/D_0)$ при $D_b/D_0 < 1/2$ (2); вертикальная прямая $D_b/D_0 \cong 1.84$ отвечает максимуму функции Бесселя, а прямая $D_b/D_0 \cong 3.83$ – радиусу первого темного кольца картины Эйри.

и, поскольку этому значению D_b отвечает максимальное значение J_1 , равное 0.582, второе условие

$$D_r \sqrt{ET_E T_c} / r \geq 346. \tag{6}$$

Значение D_b (5) отвечает оптимальному диаметру пучка D_b^{opt} , т.к. при этом энергия E_r , как это следует из (2), максимальна. Поскольку пучки света формируются телескопическими системами, то диаметр главного зеркала передающего телескопа $D_t = D_b$ и D_b^{opt} определяет оптимальный диаметр этого зеркала $D_t^{opt} = D_b^{opt}$.

Из предыдущих рассуждений понятно, что для определения D_t^{opt} для каждой конкретной экзопланеты необходимо определить то максимальное расстояние от центра ДК, на котором случайным образом может оказаться экзопланета в момент прихода сигнала.

4.1. Оценка максимального расстояния планеты от центра дифракционной картины в момент прихода сигнала

Поскольку параметры орбит экзопланет определяются весьма точно, то при достаточно большом D_t можно направить излучение не только на звезду, вокруг которой обращается наблюдаемая планета, но и в любую область ее орбиты. Это осуществимо, т.к. в фокусе телескопа можно добиться взаимного расположения ДК, образованной излучением звезды, и ДК, образованной излучением источника посылаемого сигнала, с точностью до сотых долей радиуса первого темного кольца [28] и обеспечить направление пучка с погрешностью, много меньшей его расходимости. Однако, как говорилось выше, из-за погрешности определения межзвездных расстояний нельзя точно синхронизовать приход сигнала в заданную область орбиты и прохождение планетой этой области. Оценим то максимальное расстояние, на котором может оказаться планета от центра ДК в момент прихода сигнала. Рас-

смотрим два предельных случая ориентации орбиты планеты относительно линии наблюдения, которые включают в себя все остальные случаи:

1. плоскость орбиты планеты перпендикулярна линии наблюдения, и тогда при ее эксцентриситете $e < 0.44$ она выглядит практически как круг;
2. плоскость орбиты планеты ориентирована таким образом, что линия наблюдения лежит в ее плоскости, и тогда орбита выглядит как отрезок прямой.

За вычетом систематического смещения частоты, обусловленного относительным движением звезд, в первом случае имеет место только поперечный эффект Доплера, девиация частоты при котором незначительна по сравнению с шириной линии усиления АКФ. Поэтому для согласования спектра излучения передатчика и спектральной полосы приемника нет разницы, на какую область орбиты планеты наводить телескоп. Расстояние между приемником и центром ДК при $e < 0.44$ с хорошей точностью меняется по закону $r = 2a |\sin(\pi t/P)|$, где a – большая полуось орбиты, а P – период обращения планеты вокруг звезды. Во втором случае при том же e целесообразно наводиться на центр упомянутого выше отрезка прямой, в котором эффект Доплера тоже поперечный, а расстояние между приемником и центром ДК меняется по закону $r = a |\sin(2\pi t/P)|$.

Пусть расстояние до наблюдаемой звезды определено с погрешностью δR , ей соответствует время $\delta R/c$. Поскольку $2 |\sin(\pi t/P)| \geq |\sin(2\pi t/P)|$, то значение r для других ориентаций орбиты заключено в пределах

$$a |\sin(2\pi \delta R/cP)| \leq r \leq 2a |\sin(\pi \delta R/cP)|. \tag{7}$$

Из (7) условием того, что планета за время $\delta R/c$ может оказаться на расстоянии от центра ДК, равном a или большем его, является неравенство $\delta R/P \geq c/4$. В этом случае нет смысла наводиться на определенную точку орбиты планеты. Наиболее простым будет вариант наведения телескопа непосредственно на звезду. При этом максимальное расстояние планеты от центра ДК \bar{r} будет равно a . Если δR выразить в парсеках, а период P в земных сутках, то записанное выше неравенство принимает вид

$$\delta R/P > 2.1 \times 10^{-4}. \tag{8}$$

Условием же того, что в течение времени $\delta R/c$ расстояние от центра ДК будет меньше a , является неравенство $\delta R/P < c/6$ ($\delta R/P < 1.4 \times 10^{-4}$ пк/сут.). Если оно выполнено, то наводиться надо на центр отрезка прямой, о котором говорилось выше. При этом максимальное удаление приемника от центра ДК, как следует из (7), $\bar{r} = 2a |\sin(\pi \delta R/cP)|$. Когда $2\pi \delta R/cP \ll 1$, то $\bar{r} \cong 2\pi a \delta R/cP$, или

$$\bar{r} \cong 7480 a \delta R/P, \tag{9}$$

если δR исчисляется в парсеках, a – в астрономических единицах, а P – в земных сутках.

4.2. Оценка оптимальных размеров передающих телескопов для потенциально обитаемых экзопланет

Выясним, выполняются или нарушаются условия $\delta R/P < 1.4 \times 10^{-4}$ и $\delta R/P > 2.1 \times 10^{-4}$ для широко обсуждаемых в литературе экзопланет, которые относятся к

Табл.1. Астрономические характеристики экзопланет.

Экзопланета	Созвездие	R (пк)	a (а.е.)	e	P (сут.)
Karpetyn b	Живописец	3.91 ± 0.01	0.168	0.21	49
Gliese 667C c	Скорпион	6.2 ± 0.1	0.12	0	28
Gliese 581 d	Весы	6.2 ± 0.1	0.22	0	67
Gliese 581 c	Весы	6.2 ± 0.1	0.07	0.177	13
Gliese 581 g	Весы	6.25 ± 0.09	0.146	0	37
Gliese 163 c	Золотая рыба	15	0.125	0.1	26
Gliese 832 c	Журавль	4.9	0.162	0.03	36
Kepler-22 b	Лебедь	190	0.849	–	290
Kepler-69 c	Лебедь	830	0.64	0.14	242
61 Virginis b	Дева	8.52 ± 0.05	0.05	0.12	4.21
HD 85512 b	Парус	11.1 ± 0.1	0.26	0.11	54.4
tau Ceti c	Кит	3.65 ± 0.002	0.552	0.05	168

разряду потенциально обитаемых, а именно Karpetyn b, Gliese 667C c, Gliese 581 d, Gliese 581 c, Gliese 581 g, Gliese 163 c, Gliese 832 c, Kepler-22 b, Kepler-69 c, 61 Virginis b, HD 85512 b и tau Ceti e (диапазон расстояний от 3.6 до 830 пк). В табл.1 представлены их астрономические характеристики. Погрешности расстояний от экзопланет до Солнца считаем такими же, как и расстояний от Солнца до звезд, вокруг которых они обращаются. Там, где погрешности расстояний не указаны, они полагались равными 10% [29].

Прежде всего, были рассчитаны отношения $\delta R/P$ и \bar{r} для случая, когда сигнал посылается с экзопланет, а принимается на Земле, для которой, как известно, $a = 1$, $e = 0.017$, $P = 365.256$ сут. [30]. Из табл.2 видно, что только для двух экзопланет, Karpetyn b и tau Ceti e, выполняется неравенство $\delta R/P < 1.4 \times 10^{-4}$ пк/сут. и появляется смысл точного нацеливания излучения на заданные области орбиты Земли. Видно также, что за исключением экзопланет Kepler-22 b, Kepler-69 c и tau Ceti e диаметры D_r^{opt} не превышают диаметры созданных на Земле телескопов.

Другая ситуация имеет место при посыле сигналов с Земли в сторону экзопланет. Из данных табл.2 заключаем, что только для tau Ceti e имеет смысл точное нацеливание на заданные области ее орбиты, для всех же остальных планет надо наводиться на звезду, вокруг которой обращается планета. Видно, что половина рассматриваемых экзопланет для оптимальной связи требует более крупных телескопов, чем существующие на Земле. Разумеется, при более точном определении межзвездных расстояний эти результаты могут измениться из-за умень-

шения неопределенности положения планеты на орбите в момент прихода сигнала. Из табл.2 также следует, что за исключением экзопланеты tau Ceti e требования к размерам передающих телескопов при посыле сигналов в сторону Солнца более слабые, чем при посыле сигналов с Земли в сторону экзопланет.

4.3. Соотношение между размерами принимающего телескопа и энергиями импульсов посылаемых сигналов в оптимальном режиме связи

Итак, пусть посыл сигнала происходит оптимальным образом. Тогда, если принять, что пропускание атмосферы экзопланеты такое же, как и Земли, т.е. для излучения с $\lambda = 1.315$ мкм $T_c = T_E > 0.8$ [31], соотношение (6) при $r = \bar{r}$ принимает вид

$$D_r \sqrt{E}/\bar{r} \geq 432. \quad (10)$$

В табл.2 представлены минимально допустимые диаметры принимающих телескопов $D_r^{\text{min}} = 432\bar{r}/\sqrt{E}$ при приеме лазерных импульсов с $E = 2$ кДж, а также требуемая энергия импульсов $E = (432\bar{r}/D_r)^2$ при $D_r = 10$ м при посыле сигналов как с экзопланет на Землю, так и с Земли на экзопланеты. Обратим внимание на то, что в случае посылы сигналов с экзопланет, для которых \bar{r} для Земли в момент прихода сигнала равно полуоси земной орбиты, а E составляет 2 кДж, диаметр $D_r^{\text{min}} = 9.7$ м (результат, полученный ранее в [11, 14] другими способами). Для экзопланет Karpetyn b и tau Ceti e, при посыле сигналов с которых ДК меньше, чем орбита Земли, D_r^{min} существенно меньше 10 м. При посыле сигналов с Земли диаметры принимающих телескопов на всех экзопланетах (табл.2) существенно меньше 10 м. Можно сделать вывод, что за исключением экзопланеты tau Ceti e обнаружить сигналы, посылаемые с Земли, проще, чем сигналы, посылаемые с рассмотренных экзопланет.

5. Требования к размерам телескопов и энергии лазерных импульсов в неоптимальном режиме

Из табл.2 видно, что для шести из двенадцати рассмотренных экзопланет условия оптимизации лазерной связи можно выполнить, используя оптические телескопы с диаметром главного зеркала, не превышающим диа-

Табл.2. Параметры осуществления межзвездной связи в оптимальном режиме.

Экзопланета	Сигналы с экзопланеты на Землю					Сигналы с Земли на экзопланету				
	$\delta R/P$ (пк/сут.)	\bar{r} (а.е.)	D_r^{opt} (м)	D_r^{min} (м) при $E = 2$ кДж	E (Дж) при $D_r = 10$ м	$\delta R/P$ (пк/сут.)	\bar{r} (а.е.)	D_r^{opt} (м)	D_r^{min} (м) при $E = 2$ кДж	E (Дж) при $D_r = 10$ м
Karpetyn b	2.7×10^{-5}	0.2	3.1	1.93	75	2.0×10^{-4}	0.168	3.7	1.6	53
Gliese 667C c	2.7×10^{-4}	1.0	0.99	9.7	1.9×10^3	3.6×10^{-3}	0.12	8.2	1.2	27
Gliese 581 d	2.7×10^{-4}	1.0	0.99	9.7	1.9×10^3	1.5×10^{-3}	0.22	4.5	2.1	90
Gliese 581 c	2.7×10^{-4}	1.0	0.99	9.7	1.9×10^3	7.7×10^{-3}	0.07	14	0.68	9
Gliese 581 g	2.5×10^{-4}	1.0	1.0	9.7	1.9×10^3	2.5×10^{-3}	0.146	6.8	1.4	40
Gliese 163 c	4.1×10^{-3}	1.0	2.4	9.7	1.9×10^3	5.8×10^{-3}	0.125	19	1.2	29
Gliese 832 c	1.3×10^{-3}	1.0	0.78	9.7	1.9×10^3	1.4×10^{-2}	0.162	4.8	1.6	49
Kepler-22 b	5.2×10^{-2}	1.0	30	9.7	1.9×10^3	6.5×10^{-2}	0.849	36	8.2	1345
Kepler-69 c	2.3×10^{-1}	1.0	130	9.7	1.9×10^3	3.4×10^{-1}	0.64	210	6.2	764
61 Virginis b	1.4×10^{-4}	1.0	1.35	9.7	1.9×10^3	1.2×10^{-2}	0.05	27	0.48	4.7
HD 85512 b	2.7×10^{-4}	1.0	1.76	9.7	1.9×10^3	1.8×10^{-3}	0.26	6.8	2.5	126
tau Ceti c	5.5×10^{-6}	0.041	14	0.4	3.1	1.2×10^{-5}	0.049	12	0.47	4.5

метры главных зеркал уже созданных на Земле оптических телескопов. Для некоторых же из этих экзопланет, таких как Gliese 581 c, Gliese 163 c, Kepler-22 b, Kepler-69 c, 61 Virginis b, tau Ceti e, требуемые для оптимальной межзвездной связи диаметры главных зеркал телескопов оказались больше диаметров существующих земных телескопов. Таким образом, с этими экзопланетами пока невозможно установить двустороннюю связь, работающую в оптимальном режиме. Естественно возникает вопрос: с какими же из перечисленных экзопланет можно все-таки установить связь с помощью устройств, аналогичных созданным на Земле, а с какими нельзя?

Критерий, предлагаемый в настоящей работе, позволил ответить на этот вопрос. Астрономические данные, на основании которых производились расчеты, отношение $\delta R/P$ и \bar{r} , приведены в табл.1, 2. Из них, как уже отмечалось выше, следует, что из шести перечисленных экзопланет только при посыле сигнала с экзопланеты tau Ceti e имеет смысл наводиться на заданную область земной орбиты, т.к. только для нее $\delta R/P < 1.4 \times 10^{-4}$ пк/сут. При этом расстояние \bar{r} Земли от центра ДК, образованной лазерным излучением сигнала, много меньше большой полуоси земной орбиты. При посыле сигналов с других рассматриваемых в данном разделе экзопланет достаточно навести передающий телескоп на солнечный диск. Результаты расчетов приведены в табл.3. В ней содержатся также отношения D_t/D_0 при $D_t = 10$ м и рассчитанные для них правые части критерия (4). Обратим внимание на то, что при посыле сигналов с экзопланет Gliese 581 c, Gliese 163 c, 61 Virginis b из-за их сравнительной близости к Солнцу отношение $D_t/D_0 > 3.83$, т.е. $D_t = 10$ м слишком велик для посылы сигналов на Землю. Центральное пятно ДК оказывается настолько малым по сравнению с неопределенностью положения Земли в момент прихода сигнала, что Земля с приемным устройством может оказаться далеко за пределами этого пятна. Для остальных планет $D_t/D_0 < 3.83$, что позволило рассчитать D_r^{\min} земных телескопов при энергии посылаемых с экзопланет импульсов 2 кДж и требуемую энергию посылаемых импульсов при приеме земными телескопами с $D_r = 10$ м. В табл.4

представлены результаты аналогичных расчетов, но для случая, когда лазерные сигналы посылаются с Земли на экзопланеты.

Из табл.3,4 видно, что с некоторыми из представленных в ней экзопланет с помощью технических средств, аналогичных созданным на Земле, можно осуществить связь, хотя и не в оптимальном режиме, если эти технические средства и параметры орбит планет удовлетворяют обсуждаемому в данной работе критерию. Например, посыл сигнала с Земли в сторону экзопланет Gliese 581 c, Gliese 163 c, 61 Virginis b в оптимальном режиме невозможно, но может быть осуществлен не в оптимальном режиме. Однако посыл сигнала с этих экзопланет в сторону Земли в оптимальном режиме осуществим.

В случае такой экзопланеты, как tau Ceti e, послать сигнал ни с Земли, ни с самой планеты в сторону Земли с помощью существующих технических средств в оптимальном режиме невозможно. Тем не менее, двусторонняя связь возможна в неоптимальном режиме. При этом, как видно из табл.3,4, необходимая для установления двусторонней связи энергия в импульсе не превышает 5 Дж.

Что касается таких экзопланет, как Kepler-22 b и Kepler-69 c, то существующими техническими средствами невозможно пока осуществить поиск сигналов, посылаемых с этих планет, а также послать сигнал, который мог бы быть принят на этих экзопланетах. Для этого, как видно из табл.3,4, требуются оптические телескопы существенно больших размеров, чем существующие 10-метровые телескопы, либо лазеры с энергией излучаемых импульсов, существенно превышающей 2 кДж.

6. Заключение

В настоящей работе рассмотрена межзвездная лазерная связь между Землей и экзопланетами, входящими в состав планетных систем других звезд. Получен критерий осуществимости межзвездной лазерной связи, когда центральное пятно дифракционной картины с помощью современных больших оптических телескопов может быть сделано сравнимым или даже меньше орбиты планеты, а

Табл.3. Параметры телескопов для приема сигналов с экзопланет на Земле в неоптимальном режиме.

Экзопланета	D_0 (м)	D_t/D_0	$D_r \sqrt{ET_E T_c}$		D_r^{\min} (м) при $E = 2$ кДж	E (Дж) при $D_r = 10$ м	$D_r \sqrt{ET_E T_c} / \bar{r}$	D_t/D_0	D_t (м)
			$D_t = 10$ м						
Gliese 581 c	0.535	18.7	–	–	–	–	358	1.53	0.82
Gliese 163 c	1.29	7.75	–	–	–	–	358	1.53	2.0
Kepler-22 b	16.4	0.610	692	19	7500	358	1.53	25	
Kepler-69 c	71.6	0.140	2880	80	130000	358	1.53	110	
61 Virginis b	0.735	13.6	–	–	–	–	358	1.53	1.1
tau Ceti c	7.68	1.30	15.8	0.44	3.9	8730	0.0461	0.35	

Табл.4. Параметры телескопов для посылы сигналов с Земли на экзопланеты в неоптимальном режиме.

Экзопланета	D_0 (м)	D_t/D_0	$D_r \sqrt{ET_E T_c}$		D_r^{\min} (м) при $E = 2$ кДж	E (Дж) при $D_r = 10$ м	$D_r \sqrt{ET_E T_c} / \bar{r}$	D_t/D_0	D_t (м)
			$D_t = 10$ м						
Gliese 581 c	7.64	1.31	26.9	0.75	11	5110	0.0786	0.6	
Gliese 163 c	10.4	0.965	58.7	1.6	54	2860	0.140	1.4	
Kepler-22 b	19.3	0.518	683	19	7300	421	0.956	18	
Kepler-69 c	112	0.0893	2880	80	130000	559	0.778	87	
61 Virginis b	14.7	0.680	31.3	0.9	15	7150	0.0562	0.83	
tau Ceti c	6.43	1.55	17.4	0.5	4.7	7300	0.0551	0.33	

сигнал приходит в заданную область орбиты не синхронно с планетой из-за погрешности определения расстояния между Солнцем и звездой, вокруг которой обращается планета.

На основе этого критерия получены условия оптимизации связи, учитывающие эту несинхронность путем оценки максимального расстояния от центра дифракционной картины, на котором может непредсказуемо оказаться планета в момент прихода сигнала. Для длины волны 1.315 мкм рассчитаны оптимальные диаметры передающих телескопов как при посыле лазерных сигналов на Землю с экзопланет Kapetyn b, Gliese 667C c, Gliese 581 d, Gliese 581 c, Gliese 581 g, Gliese 163 c, Gliese 832 c, Kepler-22 b, Kepler-69 c, 61 Virginis b, HD 85512 b и tau Ceti e (диапазон расстояний от 3.6 до 830 пк), которые входят в разряд потенциально обитаемых, так и при посыле на эти планеты сигналов с Земли. Выяснено, с какими из перечисленных планет возможен оптимальный режим связи с использованием телескопов диаметром до 10 м. Показано, что при 80%-ном пропускании атмосфер планет для достоверного приема сигналов должно выполняться условие: $D_r \sqrt{E}/\bar{r} > 432 \text{ Дж}^{1/2}$. Для лазерных импульсов с энергией 2 кДж рассчитаны диаметры принимающих телескопов при установке как на Земле, так и на рассмотренных экзопланетах, а также определены требования к энергии лазерных импульсов при использовании принимающих телескопов с диаметрами 10 м.

Показано, что с экзопланетами Gliese 581 c, Gliese 163 c, Kepler-22 b, Kepler-69 c, 61 Virginis b, tau Ceti e оптимальный режим связи при использовании телескопов до 10 м в диаметре невозможен, и выяснено, с какими из них все же может быть установлена связь с помощью таких телескопов, а с какими потребуются телескопы больших размеров, либо же лазеры с энергией излучаемых импульсов, превышающей 2 кДж.

1. <http://exoplanet.eu/catalog>
2. Гиндилис Л.М. *SETI: Поиск внеземного разума* (М.: Физматлит, 2004).
3. <http://edu.zelenogorsk.ru/astron/meti/zaitsev.htm>
4. www.krugozor.ru/krupnejshie-telescopy-mira.html;
<http://ziv.telescopes.ru>
5. <http://remrovinsky.com/books/laser/lasery.pdf>;
http://www.softmixer.com/2012/05/blog-post_3168.html;
Зарубин П.В. *Квантовая электроника*, **32** (12), 1048 (2002).
6. Шварцман В.Ф. В сб. *Проблема внеземных цивилизаций* (М.: Наука, 1981); Шварцман В.Ф. *Сообщения САО АН СССР*, **19**, 5 (1977).
7. <http://nauka21vek.ru/archives/34687>
8. Leeb W.R., Poppe A., Hammel E., Alves J., Brunner M., Meingast S. *Astrobiology*, **13** (6), 521 (2013).
9. Tellis Nathaniel K., Marcy Geoffrey W. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **127**, 540 (2015).
10. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Квантовая электроника*, **37** (7), 685 (2007).
11. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Орлов Е.П. *Вестник SETI*, №13/30, 12 (2007).
12. Kutaev Yu.F., Mankevich S.K., Nosach O.Yu., Orlov E.P. *Acta Astronautica*, **67** (11–12), 1384 (2010).
13. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Квантовая электроника*, **39** (11), 1008 (2009).
14. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Онтический журн.*, **78** (2), 14 (2011).
15. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент № 2337379 РФ от 15.01.2007 г. *Изобретения*, №30 (2008).
16. Носач О., Манкевич С., Орлов Е. *Лазерная локация и космическая связь на иодных лазерах* (Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015).
17. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Квантовая электроника*, **30** (9), 833 (2000).
18. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Квантовая электроника*, **32** (4), 349 (2002).
19. Fill E.E., Thieme W.H., Volk R. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12**, L41 (1979).
20. Шварц Р., Таунс К. В сб. *Межзвездная связь*. Под ред. А.Камерона (М.: Мир, 1965, с.247–256); Schwartz R.N., Townes C.H. *Nature*, **190**, 205 (1961).
21. Оливер Б. В сб. *Межзвездная связь*. Под ред. А.Камерона (М.: Мир, 1965, с.229).
22. Оливер Б. В сб. *Межзвездная связь*. Под ред. А.Камерона (М.: Мир, 1965, с.296).
23. Каплан С.А. (ред.) *Внеземные цивилизации* (М.: Наука, 1969).
24. Тартер Дж. В сб. *Проблема поиска жизни во Вселенной: Труды Таллинского симпозиума* (М.: Наука, 1986).
25. <http://spacegid.com/ekstremalno-bolshoy-teleskop-e-elt.html>
26. http://studopedia.ru/1_46861_proekt-super-teleskopa-OWL.html
27. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970).
28. Бекетова А.К., Белозёров А.Ф., Березин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
29. Псковский Ю.П. *Физика космоса* (1986). www.astronet.ru/db/msg/1188617; Расторгуев А.С. *Шкала расстояний во вселенной*. www.astronet.ru/db/msg/1168006.
30. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.) *Физические величины (справочник)* (М.: Энергоатомиздат, 1991, с.1203).
31. Зуев В.С., Корольков К.С., Крылов А.Ю., Носач О.Ю., Поскачев А.Ю. *Квантовая электроника*, **15** (10), 1959 (1988).