

УДК 524 (023)

И. П. Панфилов<sup>1</sup>, В. И. Панфилов<sup>2</sup>, А. В. Соломко<sup>3</sup>, В. Г. Михайловский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Одеська національна академія зв'язку ім. А. С. Попова

<sup>2</sup> Південне територіальне управління МТС України, Одеса

<sup>3</sup> Одеський філіал Українського державного центру радіочастот

<sup>4</sup> МТС України, Київ

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА РАДИОСИГНАЛОВ ОТ КОРРЕСПОНДЕНТОВ С ВЗАИМНО НЕИЗВЕСТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ В КОСМОСЕ

*Приводятся результаты вероятностной оценки поиска радиосигналов корреспондентов с взаимно неизвестным расположением. Получены формулы вероятности обнаружения хотя бы одного корреспондента с неизвестными координатами и среднего их числа, которые могут быть обнаружены приёмной системой с заданными параметрами. Показано, что даже многократное повторение серий наблюдений с использованием известных методик не позволяет увеличить вероятность их обнаружения до какого-нибудь приемлемого с практической точки зрения уровня. Это означает практическую невозможность обнаружения сигналов от корреспондентов такого типа на космических расстояниях при общепринятом подходе без существенного, на 5–10 порядков, увеличения временных и/или материальных затрат при организации измерений, что обуславливает необходимость разработки принципиально новой стратегии поиска.*

### СУТЬ ПРОБЛЕМЫ И АКТУАЛЬНОСТЬ

Целый ряд практических задач космической радиосвязи сводится к проблеме организации радиоканала между корреспондентами, не имеющими информации о взаимном пространственном положении в той или иной системе координат в условиях крайне жестких ограничений на энергетику канала связи вследствие значительных расстояний между корреспондентами.

Характерными примерами задач, сводящихся к указанной постановке, являются:

- установление (восстановление) связи и управления космическими объектами после потери ими пространственной ориентации;
- поиск и идентификация сигналов космических объектов при отсутствии достоверной информации об их технических параметрах и назначении;
- комплекс проблем поиска радиосигналов внеземных цивилизаций (ВЦ) — проблемы SETI и др.

Последняя задача может выступать как модельная в этом ряду, так как что при ее решении

все проблемы, связанные с организацией канала с потенциальным корреспондентом, проявляются в наиболее сложных условиях. Действительно, при поиске радиосигналов ВЦ приходится рассчитывать на наихудшие из возможных условий:

- расстояния между корреспондентами — галактического масштаба (единицы — сотни световых лет);
- полная неопределенность в вопросах возможного размещения потенциальных корреспондентов (опять же, как минимум, в масштабе Галактики);
- отсутствие каких-либо данных о количестве корреспондентов, используемых технических средствах и их параметрах.

В связи с вышесказанным представляет интерес анализ именно этой задачи.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

*Исходные посылки.* Необходимо разработать математическую модель, описывающую количественные характеристики (критерии) эффектив-

© И. П. ПАНФИЛОВ, В. И. ПАНФИЛОВ, А. В. СОЛОМКО,  
В. Г. МИХАЙЛОВСКИЙ, 2010

ности поиска радиосигналов ВЦ. Она должна базироваться на общепринятых, установленных научно-технических данных (общие принципы радиосвязи, строение Галактики, математические модели распространения радиоволн, антенно-фидерных устройств, радиотехнических устройств обработки сигналов и т. п.), коррелировать с опубликованными данными и подтверждаться многолетней практикой и результатами ранее реализованных проектов SETI [1–9].

При построении расчетной модели будем использовать следующие исходные данные.

1. Информация о строении Галактики. Предполагается, что геометрическая форма нашей Галактики может быть приближена эллипсоидом вращения с главными полуосями  $R_g = 50000$  световых лет (св. лет) и  $H_g = 750$  св. лет. Солнечная система (точка наблюдения и приема сигналов ВЦ) расположена в средней зоне Галактики на расстоянии около 30000 св. лет от ее центра и 30 св. лет от экваториальной плоскости. Распределение звезд в первом приближении равномерно в объеме эллипсоида. Межзвездная среда в целом изотропна, однородна, затухание в среде вследствие потерь при распространении электромагнитных волн пренебрежимо мало.

2. Информация о потенциальных источниках сигналов ВЦ. Количество ВЦ с уровнем технологического развития, достаточным для организации информационных радиоканалов связи в галактических масштабах, определяется формулой Дрейка и далее обозначено как  $N$ . Цивилизации в Галактике распределены случайно, по равномерному закону с постоянной объемной плотностью распределения:

$$\rho = \frac{N}{V_g}, \quad (1)$$

где  $V_g$  — объем эллипсоида, (св. лет)<sup>3</sup>.

3. Информация о применяемых при организации радиосвязи технических средствах и методиках установления связи. Предполагается, что информационные сигналы ВЦ должны быть как минимум нашего уровня развития технологий, но не радикально более развитыми, прежде всего по энерговооруженности. Для расчета энергетики применяется стандартная модель радиоканала:

передающая система, среда распространения, приемная система.

Передающая система ВЦ включают радиопередатчик мощностью  $P_t$  (подстрочный индекс  $t$  везде далее относится к передающей стороне радиоканала) с полосой частот излучения  $\Delta f$  на длине волны  $\lambda$  и передающую антенну с изотропным коэффициентом усиления  $G_{tmax}$ .

Приемная система на Земле включает приемную антенну с изотропным коэффициентом усиления  $G_{rmax}$  (подстрочный индекс  $r$  везде далее относится к приемной стороне радиоканала) и приемник с суммарной шумовой температурой по входу  $T_\Sigma$ . Далее для простоты предполагается, что полосы частот приема и передачи совпадают.

Передающая и приемная антенны предполагаются остронаправленными, с осесимметричными относительно направления максимального излучения  $\theta_{max}$  диаграммами направленности, аппроксимируемыми кусочно-постоянными функциями вида

$$G(\theta) = \begin{cases} G_{max}, & \theta \in [\theta_{max} - \Delta\theta/2; \theta_{max} + \Delta\theta/2], \\ 0, & \theta \notin [\theta_{max} - \Delta\theta/2; \theta_{max} + \Delta\theta/2], \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta\theta$  — ширина диаграммы направленности по половинной мощности.

Для остронаправленных антенн подобного типа с высокой точностью выполняется приближенное соотношение между шириной диаграммы направленности и максимальным коэффициентом усиления:

$$G_{max} = 10/\Delta\theta^2 \quad (3)$$

при условии, что ширина диаграммы направленности измеряется в радианах.

**Критерии эффективности поиска сигналов.** В предположениях, изложенных выше, расчет энергетики радиоканала показывает, что при современных (либо даже достижимых в обозримом будущем) технологиях спорно рассматривать для задач межзвездной радиосвязи системы с ненаправленными и слабонаправленными антеннами. В этом случае при любых разумных допущениях о мощностях передатчиков ВЦ и достигнутой чувствительности наших приемников дальность связи недостаточна даже для контакта с ближайшими звездными системами.

В условиях же применения остронаправленных антенн с узкими игольчатыми диаграммами неизбежно встает вопрос о пространственной ориентации максимума излучения. При отсутствии у корреспондентов информации о взаимном расположении, ориентация антенн осуществляется в соответствии с некоторой принятой стратегией, например в виде последовательного обзора всего пространства, или перебора некоторых приоритетных направлений, или хаотичного поиска в случайных направлениях. Различными программами в рамках проектов SETI на Земле были реализованы подобные варианты стратегий.

Тем не менее, при любой выбранной стратегии ориентации передающей антенны и при отсутствии данных о месторасположении корреспондента на приемной стороне усиление передающей антенны представляет собой случайную величину, распределенную по некоторому вероятностному закону в диапазоне величин от 0 до  $G_{\max}$ . Тогда максимальная дальность обнаружения  $R$  сигналов ВЦ также является случайной величиной со своей плотностью распределения вероятности  $f(R)$  в диапазоне от 0 до  $R_{\max}$ .

Кроме того, естественно, количество ВЦ, которые могут оказаться в зоне обнаружения, также является случайной величиной.

Таким образом, учет вероятностного характера связи при отсутствии *a priori* достоверной информации о корреспонденте неизбежно приводит к необходимости использования соответствующих корректных вероятностных численных критериев эффективности поиска ВЦ.

Наиболее подходящими для построения критериев представляются следующие очевидные и наглядные величины.

1. Вероятность  $W$  обнаружения хотя бы одной ВЦ приемной системой с заданными параметрами.

2. Среднее количество  $M$  (математическое ожидание) ВЦ, которые могут быть обнаружены приемной системой с заданными параметрами.

Дальнейшее рассмотрение основано на расчете именно этих величин для оценки и сравнения применяемых и предлагаемой методик поиска сигналов ВЦ.

**Основные расчетные соотношения.** При заданных параметрах приемной и передающей систем потенциальных корреспондентов дальность обнаружения их сигналов может быть определена через известное основное уравнение радиолонии [7]:

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (4)$$

где  $P_r$  — мощность сигнала на входе радиоприемного устройства,  $G_{r,t}$  — коэффициенты усиления приемной и передающей антенн корреспондентов в направлении друг на друга.

Максимальная длина радиоканала (дальность обнаружения сигнала) определяется из условия, что мощность сигнала на входе приемника достигает минимально допустимого уровня, обусловленного в конечном итоге величиной чувствительности (шумовой температуры) приемного устройства.

Граничное условие обнаружения сигнала приемником, как известно, может в достаточно общей форме быть записано как [8]:

$$T_r = T_\Sigma / \sqrt{\tau \cdot \Delta f}, \quad (5)$$

где  $T_r$  — эквивалентная шумовая температура сигнала,  $\tau$  — время наблюдения.

Из выражений (4) и (5) следует, что в общем случае максимальная дальность приема равна

$$R_{\max} = \frac{5\lambda}{2\pi \Delta\theta_r \Delta\theta_t} \sqrt{\frac{P_t}{kT_\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\Delta f}}, \quad (6)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Таким образом, при поиске в определенном фиксированном направлении сигнал ВЦ с заданными параметрами будет обнаружен только в том случае, если его источник находится внутри конической области с углом раскрытия  $\Delta\theta_r$  и некоторым радиусом  $R$ . Физический объем зоны обнаружения такой формы равен

$$V(R) = \frac{4}{3} \pi R^3 \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_r}{4} \right). \quad (7)$$

Дальность приема в значительной степени обусловлена факторами, которые зависят только от ВЦ, а именно мощностью передатчика и коэффициентом усиления передающей антенны в направлении на Землю. Мощность передатчика не является определяющим фактором в предпо-

ложении достаточной технической развитости ВЦ, а вот влияние величины усиления передающей антенны ВЦ является принципиальным.

Выше было отмечено, что при отсутствии информации о взаимном расположении корреспондентов усиление передающей антенны ВЦ в направлении на приемную антенну представляет собой случайную величину. Очевидно также, что размеры и объем зоны обнаружения вследствие этого также случайны.

Если диаграмма направленности передающей антенны описывается соотношением (2), то величина коэффициента усиления антенны в направлении на корреспондента может принимать только два значения: 0 и  $G_{\max}$ , а плотность распределения вероятности величины  $R$  задается выражением:

$$f(R) = W_0 \delta(R) + W_{\max} \delta(R - R_{\max}). \quad (8)$$

Здесь  $\delta(R)$  — дельта-функция Дирака,  $W_{\max}$  — вероятность попадания приемной антенны в основной лепесток диаграммы направленности передающей антенны,  $W_0$  — вероятность непопадания приемной антенны в основной лепесток диаграммы направленности передающей антенны.

Если параметры передающей антенны соответствуют высказанным выше предположениям, а ее ориентация в пространстве равновероятна в полном телесном угле, то величина  $W_{\max}$  в (8) равна отношению площади шарового сегмента с углом раскрытия в основании  $\Delta\theta_l$  к площади сферы:

$$W_{\max} = \sin^2\left(\frac{\Delta\theta_l}{4}\right), \quad (9)$$

а величина  $W_0$  дополняет ее до единицы:

$$W_0 = \cos^2\left(\frac{\Delta\theta_l}{4}\right). \quad (10)$$

Для реальной диаграммы направленности выражение для плотности распределения вероятности  $R$  превращается в некоторую непрерывную функцию в диапазоне от 0 до  $R_{\max}$ .

Получим численную оценку эффективности поиска радиосигналов ВЦ в одном фиксированном направлении. Для этого рассчитаем вероятность  $W$  обнаружения хотя бы одной ВЦ приемной системой с заданными параметрами.

Если в объеме Галактики  $V_g$  случайным образом равномерно распределены  $N$  ВЦ, то вероятность того, что в зону обнаружения объемом  $V(R)$  попадет хотя бы одна из них, очевидно, выражается формулой

$$W(R) = 1 - \left(1 - \frac{V(R)}{V_g}\right)^N. \quad (11)$$

Учитывая то, что объем зоны обнаружения  $V(R)$  является также случайным по приведенным выше соображениям, для определения  $W$  применим интегральную оценку полной вероятности в виде

$$W = \int_0^{R_{\max}} f(R) \left[1 - \left(1 - \frac{V(R)}{V_g}\right)^N\right] dR. \quad (12)$$

Подставив (7)–(10) в (12), окончательно получим

$$W = \left[1 - \left(1 - \frac{4}{3} \pi \frac{R_{\max}^3}{V_g} \sin^2\left(\frac{\Delta\theta_r}{4}\right)\right)^N\right] \sin^2\left(\frac{\Delta\theta_l}{4}\right). \quad (13)$$

Численную оценку эффективности поиска радиосигналов ВЦ в одном фиксированном направлении получим другим способом, для чего рассчитаем математическое ожидание  $M$  количества ВЦ, которые могут быть обнаружены приемной системой с заданными параметрами.

Количество ВЦ, попадающих в зону обнаружения объемом  $V(R)$ , очевидно, также является случайной величиной, только дискретной, принимающей любые целые значения  $n$  в диапазоне от 0 до  $N$ , и распределенной биномиально.

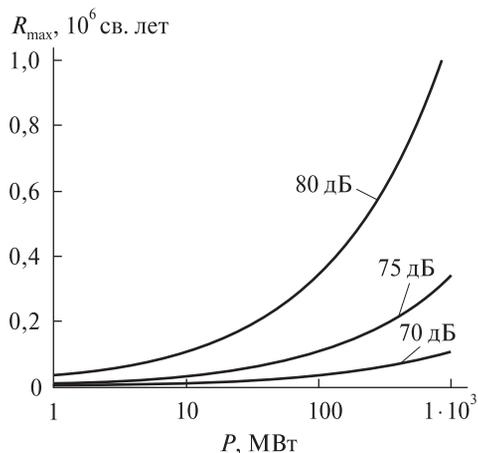
Вероятность реализации определенного значения  $n$  выражается формулой

$$W(n, R) = C_N^n \left(\frac{V(R)}{V_g}\right)^n \left(1 - \frac{V(R)}{V_g}\right)^{N-n}, \quad (14)$$

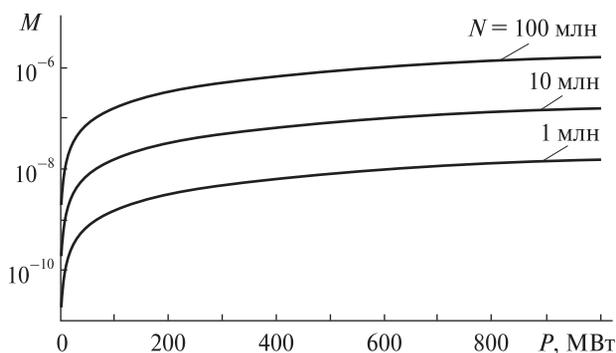
где  $C_N^n$  — биномиальные коэффициенты.

Вероятность обнаружения  $n$  ВЦ по (14) зависит еще от случайной величины объема зоны наблюдения  $V(R)$ . Полная вероятность попадания  $n$  ВЦ в зону обнаружения приемной системы определяется в виде

$$W(n) = \int_0^{R_{\max}} f(R) W(n, R) \quad (15)$$



**Рис. 1.** Зависимость максимальной дальности  $R_{\max}$  обнаружения сигналов от мощности  $P$  передатчика ВЦ при разных значениях коэффициентов усиления  $G$  передающей и приемной антенн (числа у кривых)



**Рис. 2.** Среднее количество  $M$  ВЦ, обнаруживаемых в одном направлении при разных значениях предполагаемого числа  $N$  ВЦ в Галактике (числа у кривых) и мощности  $P$  передатчиков

Соответственно при подстановке (8)–(10) в (15) получим

$$W(n) = W_{\max} W(n, R_{\max}). \quad (16)$$

Определим значение математического ожидания числа ВЦ, попадающих в зону обнаружения приемной системы:

$$M = \sum_{n=0}^N n W(n). \quad (17)$$

Подставив выражения (14), (16) в (17), получим

$$M = W_{\max} \sum_{n=0}^N n C_N^n \left( \frac{V(R_{\max})}{V_g} \right)^n \left( 1 - \frac{V(R_{\max})}{V_g} \right)^{N-n}, \quad (18)$$

и окончательно —

$$M = \frac{4}{3} \pi N \frac{R_{\max}^3}{V_g} \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_t}{4} \right) \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_r}{4} \right). \quad (19)$$

**Результаты расчетов.** Расчет показателей эффективности поиска сигналов ВЦ может быть проведен для любых числовых параметров.

В качестве примера приведем результаты оценки среднего числа ВЦ, которые обнаруживаются в типовой ситуации с параметрами: полоса частот приема/передачи — 1 Гц, длина волны — 21 см, время наблюдения — 480 мин, шумовая температура приемника — 330 К.

Учитывая принципиальное отсутствие достоверной фактической информации о внеземных цивилизациях, все предположения относительно их характеристик, параметров технических средств носят оценочный характер.

Поэтому нижеприведенные расчеты представлены в виде зависимостей интересующих нас величин в диапазоне возможного (или наиболее вероятного) изменения соответствующих параметров ВЦ.

Например, для оценки мощности передатчика ВЦ использован диапазон значений от 1 МВт (уровень, уже реализуемый технологической цивилизацией на Земле) до 1 ГВт (распространенная в технической литературе оценка перспективных параметров передатчиков ВЦ земного типа).

Значения максимальных коэффициентов усиления приемной и передающей антенн могут быть оценены различными способами.

В качестве примера рассмотрен следующий вариант:

- коэффициенты усиления (КУ) приемной и передающей антенн одинаковы;
- КУ антенн подстраиваются в зависимости от направления работы с целью максимизации объема пространственной зоны обнаружения корреспондентов в пределах Галактики (т. е. используется «рациональная стратегия» — применяются антенны с минимальным КУ, обеспечивающим дальность связи до границы Галактики в выбранном направлении);
- КУ антенн не могут превышать некоторого «технологического» предела (в расчетах установленного на уровне 80 дБ).

При таком подходе все расчетные параметры для однократного наблюдения становятся функциями от ориентации антенн. Поэтому в дальнейшем представлены результаты усреднения соответствующих величин по всем направлениям в полном телесном угле.

Зависимость максимальной дальности  $R_{\max}$  обнаружения источника радиосигнала в вышеприведенных предположениях представлена на рис. 1 при разных значениях коэффициентов усиления  $G$  передающей и приемной антенн.

На рис. 2 представлена зависимость среднего числа  $M$  обнаруживаемых ВЦ при разных значениях ключевых исходных данных — предполагаемого числа  $N$  ВЦ в Галактике (оценка Дрейка) и мощности  $P$  передатчиков, применяемых ВЦ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа представленных зависимостей следует вывод, что даже при самых оптимистических предположениях относительно распространенности и энерговооруженности ВЦ вероятность их обнаружения традиционными методами чрезвычайно мала (порядка  $10^{-6}$  ...  $10^{-11}$ ).

Увеличение этой вероятности до сколько-нибудь приемлемого уровня путем последовательного сканирования различных пространственных направлений и различных частот требует, очевидно, адекватного (в  $10^5$ ... $10^{10}$  раз) увеличения времени наблюдения (либо соответствующих материальных затрат при организации параллельных наблюдений).

Это означает на нынешнем организационно-техническом уровне развития практическую невозможность обнаружения сигналов ВЦ при общепринятом подходе, что объясняет существование «парадокса Ферми» и приводит к необходимости разработки новой стратегии поиска.

1. Гиндилис Л. М. Поиск Внеземного Разума. — М.: Физматлит, 2004. — 648 с.

2. Голдсмит Д., Оуэн Т. Поиски жизни во Вселенной. — М.: Мир, 1983. — 488 с.
3. Кардашев Н. С. О стратегии поиска внеземных цивилизаций // Вопр. философии. — 1977. — № 12. — С. 43—54.
4. Проблема поиска жизни во Вселенной // Тр. Таллинского симпозиума. — М., 1986.
5. Тартер Дж. Обзор экспериментальных исследований по поиску сигналов внеземных цивилизаций (в радио и оптическом диапазонах). «Космический стог сена» и современные программы SETI в США // Проблема поиска жизни во Вселенной. — М., 1986. — С. 170—182; 220—225.
6. Филиппова Л. Н. About the radio-observation of the selected SETI-object by RATAN-600, RT-15 and RT-3 as an information for the reflection on the SETI strategy // Тр. Таллинского симпозиума. — М., 1986.
7. Черенкова Е. Л., Чернышев О. В. Распространение радиоволн. — М.: Радио и связь, 1984. — 272 с.
8. Шкловский И. Разум. Жизнь. Вселенная. — М.: Янус, 1966.
9. Allen Telescope Array Fact Sheet // Пресс-релиз института SETI. — <http://www.seti.org/ata/>.

Надійшла до редакції 30.10.09

I. P. Panfilov, V. I. Panfilov, A. V. Solomko,  
V. G. Mikhailovskii

## THE ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE SEARCH FOR RADIO SIGNALS FROM CORRESPONDENTS WITH A MUTUALLY UNKNOWN LOCATION IN SPACE

We give some results of probabilistic estimation of the search for radio signals from correspondents with a mutually unknown location. We derived the formulas for the probability to reveal at least one correspondent with unknown coordinates and to find the average number of such correspondents using a receiving system with preset parameters. It is shown that even the reiteration of observation series with the use of known methods does not allow us to increase the probability of their discovery to some level acceptable from the practical point of view. This means practical impossibility to detect signals from the correspondents of such a type at space distances using universally accepted approach and results in the necessity to elaborate a new search strategy.