Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 254–257.

УДК 537.871.5, 537.876, 537.876.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-254
ORCID: 0009-0000-2697-0257, 0000-0002-8662-9058

МОДЕЛЬ РАДИОКАНАЛА ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.А. Ивонин[1], В.П. Лебедев[1]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, ivonin1480@iszf.irk.ru

RADIO CHANNEL MODEL OF IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR FOR SPACECRAFT RADAR CROSS-SECTION MEASUREMENTS

V.A. Ivonin[1], V.P. Lebedev[1]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ivonin1480@iszf.irk.ru

Аннотация. Описана методика определения эффективной площади рассеяния (ЭПР) космических аппаратов (КА) на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) с использованием координатной информации, получаемой на ИРНР в режиме радиолокационных измерений, и электронной концентрации, получаемой в режиме ионосферных измерений. Приведены результаты исследования среднесуточной динамики ЭПР спутников мегасозвездия Starlink: установлена ее связь с ориентацией КА относительно Солнца.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, Иркутский радар некогерентного рассеяния, эффект Фарадея, Starlink.

Abstract. This paper describes the technique for determining the radar cross section (RCS) of spacecraft using the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. The approach utilizes coordinate data obtained in radar mode combined with electron density measurements from ionospheric mode. The study investigates the mean diurnal RCS dynamics of Starlink satellites, revealing a relationship between their RCS and solar-targeted orientation.

Keywords: radar cross section, Irkutsk Incoherent Scatter Radar, Faraday effect, Starlink.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время число запусков космических аппаратов (КА) на околоземную орбиту стремительно растет. Количество отслеживаемых космических объектов (КО) уже превышает 40 тыс., кроме того, по оценкам Европейского космического агентства [ESA's Annual Space Environment Report, 2026], на низкой околоземной орбите (НОО) находится более $1.2 \cdot 10^6$ некаталогизированных КО размером 1–10 см. Значительный вклад в заселенность орбиты вносят спутниковые мегасозвездия: на НОО находится свыше 8 тыс. КА Starlink [https://planet4589.org], а в дальнейшем планируется расширение группировки до 30 тыс. КА.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) является важной характеристикой КО, позволяющей оценить его размер и ориентацию. Определение ЭПР затруднено из-за высокой чувствительности измерений к ракурсу наблюдения объекта и положению КО в секторе сканирования радара [Anfinsen et al., 2023].

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) в режиме радиолокационных (РЛ) измерений определяет координатную информацию КО, а в режиме ионосферных исследований — электронную концентрацию ионосферы. Синтез этих данных позволяет разработать методику определения ЭПР с учетом особенностей антенной системы ИРНР и среды распространения РЛ-сигнала.

МОДЕЛЬ РАДИОКАНАЛА

Радиолокационные наблюдения КА на ИРНР выполняются методом частотного сканирования. Во время каждого пролета КА формируется набор измеренной информации (трек). В состав координатной информации входят дальность (R), антенный угол места (γ) и антенный азимут (ε). На рис. 1 схематически представлена геометрическая конфигурация эксперимента. Красными линиями обозначена система координат (СК) ИРНР, серым цветом — сектор сканирования. Зеленой линией показан измеренный трек КА Starlink-3677 за 18 марта 2025 г., 23:03:36 UT (NORAD 51970); синей штриховой линией — соответствующая эфемерида данного КА.

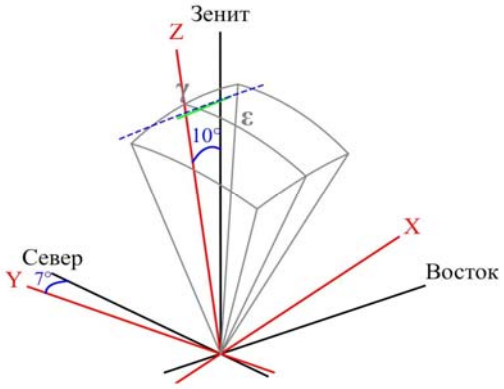

Рис. 1. Геометрическая конфигурация радиолокационных измерений

Мощность РЛ-сигнала P_r, отраженного от КА и принятого антенной ИРНР, описывается следующим образом [Лебедев, 2015]:

$$P_r(\vec{r},t) = \mu F_{tr}(\gamma,\varepsilon)F_r(\gamma,\varepsilon)\sigma(\vec{r},t) + n(t), \qquad \mu = \frac{P_{tr}G_0^2c^2}{64\pi^3R^4f^2}\left(\Omega(\vec{r},t)\right), \qquad (1)$$

где P_{tr} — импульсная мощность излучения, $\vec{r} = (R,\varepsilon,\gamma)$ — радиус-вектор КА в СК ИРНР, t — время, F_{tr}, F_r — диаграммы направленности (ДН) ИРНР по мощности на излучение и на прием соответственно, G_0 — коэффициент усиления антенны ИРНР, c — скорость света в вакууме, f — частота РЛ-сигнала, σ — ЭПР, n — шум. Поскольку в раскрыве рупора антенны ИРНР установлен поляризационный фильтр, пропускающий только одну линейную поляризацию [Лебедев, 2015], мощность РЛ-сигнала модулирована эффектом Фарадея, вследствие чего угол поворота Ω большой полуоси эллипса поляризации радиоволны:

$$\Omega(\vec{r},t) = \frac{q_e^3}{c\varepsilon_0 m_e^2\omega^2}\int_0^{\vec{r}} N_e(\vec{r}',t)\left|\vec{B}(\vec{r}',t)\right| cos\, cos\left(\alpha(\vec{r}',t)\right) d\vec{r}', \qquad (2)$$

где q_e — элементарный заряд, ε_0 — электрическая постоянная, $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота РЛ-сигнала, N_e — электронная концентрация ионосферы, $\vec{B}$ — геомагнитная индукция, α — угол между волновым вектором радиоволны и $\vec{B}$, а интегрирование ведется вдоль радиус-вектора КА.

Из формул (1), (2) видно, что, помимо координатной информации, для вычисления ЭПР необходимо учитывать влияние ДН на принятый РЛ-сигнал, а также использовать информацию об N_e, получаемую на ИРНР в режиме ионосферных измерений независимо от РЛ-измерений [Алсаткин и др., 2020].

Измеряемая на ИРНР координатная информация имеет погрешности. При этом модель ДН, полученная в работе [Лебедев, 2015], также характеризуется неопределенностями, обусловленными необходимостью калибровки параметров и влиянием внешних условий. Таким образом, ошибка в измерении антенных углов приводит к значительным ошибкам при моделировании ДН, поскольку в азимутальной плоскости ее ширина по уровню 3 дБ не превышает 0.5°.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭПР

Методика состоит из двух этапов. На первом этапе посредством фитирования модельной мощности РЛ-сигнала в зарегистрированную выполняется коррекция измеренного антенного азимута и полуширины ДН. Поскольку ошибка в измерении антенного азимута приводит к наибольшей ошибке в моделировании ДН, корректируются параметры прямой, которой линеаризуется трек ε(γ):

$$\varepsilon_i(\gamma_i) = A\gamma_i + B, \qquad (3)$$

где i — порядковый номер точки трека, A, B — параметры линейной регрессии.

Формулу (1) можно упростить, пренебрегая различиями между ДН на излучение и на прием: $F_{tr} = F_r = F$. Основной лепесток ДН ИРНР аппроксимируется гауссианой:

$$F^2(\gamma_i,\varepsilon_i) = e^{-\frac{(\gamma_i-\gamma_0)^2}{\sigma_\gamma^2}-\frac{(\varepsilon_i-\varepsilon_0)^2}{\sigma_\varepsilon^2}}, \qquad (4)$$

где $\gamma_0 = 0°$ — положение максимума угломестной ДН, ε_0 — угол отклонения максимума азимутальной ДН от нормали антенны, соответствующий рабочей частоте РЛ-сигнала. Тогда уровни ДН — это семейство подобных концентрических эллипсов с центрами в точках (γ_0; ε_0) (рис. 2). С учетом этого функционал, минимизация которого позволит определить параметры скорректированной прямой с заданной регуляризацией, имеет вид

$$S(A,B) = \sum_i \left(ln\, ln\left(\frac{P_{ri}}{\mu_i}\right) - W_{ki} - \rho_i^2(A,B)L_{ki}\right)^2 + \lambda_{reg}\sum_i \left(\frac{A\gamma_i+B-\varepsilon_{ri}}{\Delta\varepsilon}\right)^2, \qquad (5)$$

$$\rho_i^2(A,B) = \frac{(A^2+\xi^2)(\xi^2(\gamma_i-\gamma_0)^2+(A\gamma_i-\varepsilon_{0ki}+B)^2)}{\xi^2(A\gamma_0-\varepsilon_{0ki}+B)^2}. \qquad (6)$$

где $L_{ki} = ln\, ln\,(F_{ki}^2)$, F_{ki}^2 — уровень ДН в точке касания прямой и эллипса, W_{ki} — логарифмический масштаб мощности, определяемый ЭПР и коэффициентами калибровки, $\lfloor_{reg}$ — параметр регуляризации, ε_{ri} — измеренный антенный азимут, ⊗ε — масштаб допустимого отклонения скорректированной траектории от измеренной, ⁄H 0,023 — отношение ширин ДН в азимутальной и угломестной плоскостях, а индекс ki означает принадлежность i-точки k-му семейству эллипсов, соответствующему рабочей частоте. Для минимизации функционала применяется линеаризация с использованием метода возмущений.

На рис. 2 приведен пример работы методики. Синими линиями обозначены уровни ДН. Черными линиями показаны истинная траектория КА и соответствующий профиль ДН. Красным цветом показана измеренная траектория, в которую внесена некоторая ошибка, вследствие чего профиль ДН, смоделированный по этой траектории, значительно отличается от истинного. Зеленым цветом обозначены скорректированная траектория и смоделированный по ней профиль ДН. Видно, что предложенный способ коррекции позволил практически полностью нивелировать внесенную ошибку.

На втором этапе выполняется получение ЭПР в абсолютных единицах с помощью отношения сигнал/шум:

$$\sigma = \frac{k_B\Delta f T_{sys}}{\mu_\eta F^2\left(\gamma_\eta,\varepsilon(\gamma_\eta)\right)} SNR_\eta \cdot 100, \qquad (7)$$

где индекс max⎪ означает, что для расчета величины используется регистрируемая на ИРНР информация в точке с максимальным коэффициентом когерентности сигналов в полурупорах антенны (⎪); SNR — отношение сигнал/шум [Бернгардт и др., 2017]: $SNR = \frac{\eta_n-\eta}{\eta-\eta_s}$, где $\eta_N = 0.1$ — коэффициент когерентности шумового сигнала, $\eta_S = 1$ — коэффициент когерентности сигналов в полурупорах в отсутствие шума. ДН рассчитывается по траектории, скорректированной на первом этапе.

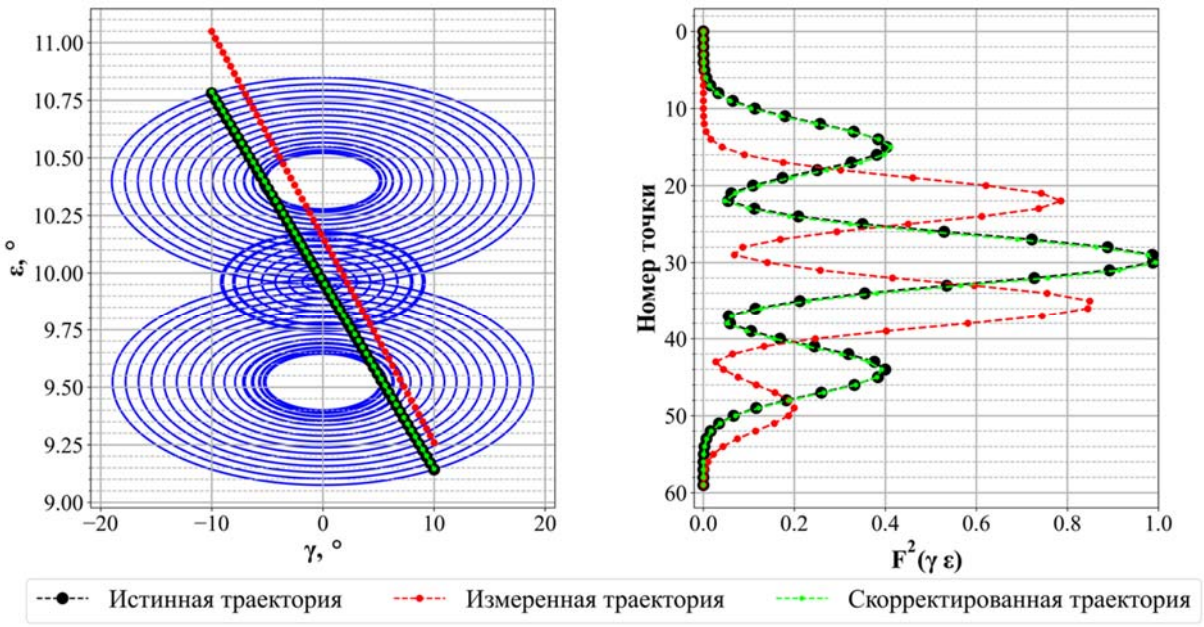

Рис. 2. Иллюстрация методики корректировки траектории

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПР КА STARLINK

Радиолокация КА Starlink на ИРНР проводилась с 23.10.2019 по 2025 г. За этот период ИРНР отработал 260 сут. В качестве целей выбирались КА преимущественно версий v1.0 и v1.5 (табл. 1), проходящие через центр сектора сканирования (см. рис. 1), с близкими координатными характеристиками: наклонение орбиты — 53°, высота орбиты — ~552 км, в среднем — 249 КА в сутки, т. е. пролет КА регистрировался каждые 5 мин.

С помощью разработанной методики была получена среднесуточная динамика ЭПР для КА версий v1.0 и v1.5 (рис. 3), поскольку КА этих версий регистрировались наибольшее число раз. Расчеты выполнялись с привлечением информационно-аналитической системы САГИ, разрабатываемой в ИСЗФ СО РАН, в которую интегрированы экспериментальные данные ИРНР и численные модели атмосферы в единой программной среде [Громик и др., 2025]. Выявлено, что суточный ход ЭПР имеет два пика: дневной (~07 UT) и ночной (~19 UT). Сравнение со среднесуточной динамикой фазового угла ® показало, что она имеет аналогичную бимодальную структуру, а моменты пиков совпадают. Это подтверждает предположение о том, что ЭПР КА Starlink значительно изменяется в течение суток вследствие переориентации КА относительно Солнца.

Таблица 1. Характеристики версий КА Starlink.

Версия	Масса, кг	Орбита	Первый запуск, UTC	Зарегистрировано на ИРНР раз
v0.9	227	550 км; 53°	24.05.2019	494
v1.0	~260	550 км; 53°	11.11.2019	49 069
v1.5	~300	540–570 км;	14.09.2021	~300
v2.0 Mini	800	525 км, 530 км, 535 км;	27.02.2023	1 326

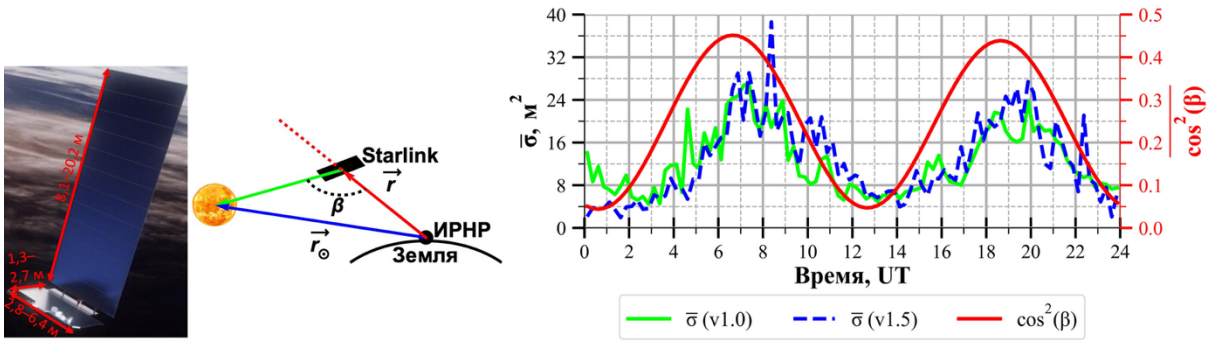

Рис. 3. Слева — схема расчета фазового угла и внешний вид КА Starlink. Справа — диаграмма среднесуточной динамики ЭПР КА Starlink и квадрата косинуса фазового угла

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика определения ЭПР по данным ИРНР с учетом особенностей антенной системы и среды распространения РЛ-сигнала. Преимуществом предложенного подхода является возможность дополнительной коррекции измеряемой на ИРНР координатной информации. Выявлена среднесуточная бимодальная (с дневным максимумом в ~07 UT и ночным в ~19 UT) динамика ЭПР КА «Starlink» и установлена ее связь с ориентацией спутников относительно Солнца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» ИСЗФ СО РАН (https://ckp-rf.ru/catalog/usu/77733/), оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН (https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности метода восстановления Ne на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 97–110. DOI: 10.12737/szf-61202009.

Anfinsen S.N., Grydeland T., Vierinen J., et al. Debris size inference from statistics of radar cross section samples // Proc. 2nd NEO and Debris Detection Conference, Darmstadt, Germany. 24–26 January 2023. Paper 62. URL: https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/neosst2/paper/62/NEOSST2-paper62.pdf (дата обращения 28.05.2026).

Бернгардт О.И., Лебедев В.П., Кутелев К.А. и др. Первые совместные наблюдения радиоавроры на радарах ИСЗФ СО РАН ультракоротковолнового и коротковолнового диапазонов // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 8. С. 692–716.

Громик Н.А., Ивонин В.П., Лебедев В.П. Информационно-аналитическая система для комплексных обработки, отображения и анализа геофизических данных, полученных на радиофизических средствах ИСЗФ СО РАН // Труды XXIX Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн», Казань, 2025. С. 102–105.

Лебедев В.П. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Иркутск, 2015. 118 с.

ESA’s Annual Space Environment Report / ESA Space Debris Office. 01.05.2026. URL: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf (дата обращения 28.05.2026).

URL: https://planet4589.org/space/con/star/stats.html (дата обращения 28.05.2026).