

**АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ МОЩНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА
ОТ СПУТНИКОВ ГРУППИРОВКИ «STARLINK»
ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

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

**ANALYSIS OF VARIATIONS IN RADAR SIGNAL POWER FROM STARLINK SATELLITES,
ACCORDING TO IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR DATA**

V.A. Ivonin, V.P. Lebedev

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia,
ivonin1480@mail.iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа данных о радиолокации спутников группировки «Starlink», проводившейся на Иркутском радаре некогерентного рассеяния с 2019 по 2023 гг. Подтверждено предположение о связи суточной динамики мощности принятого радиолокационного сигнала с суточным ходом Солнца.

Ключевые слова: Starlink, эффективная площадь рассеяния, радиолокация, фазовый угол, Иркутский радар некогерентного рассеяния.

Abstract. This paper presents the results of the radar data analysis of the Starlink constellation satellites, carried out at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar from 2019 to 2023. An assumption about the coupling between the diurnal dynamics of the received radar signal power and the diurnal cycle of the Sun has been confirmed.

Keywords: Starlink, radar cross section, radiolocation, phase angle, Irkutsk Incoherent Scatter Radar.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время низкоорбитальная спутниковая группировка «Starlink» насчитывает около 6 000 космических аппаратов (КА) [<https://www.space-track.org/#catalog>] и стремительно расширяется. Её планируемый максимальный размер — 12 000 спутников с возможным расширением до 34 400 [<https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>]. Уже при текущем размере группировки она порождает проблемы для оптической [Gallozzi et al., 2020] и радиоастрономии [Grigg et al., 2023]. С помощью Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) осуществляют зондирование ионосферы и определяют параметры ионосферной плазмы до высот около 600 км. Высота орбиты подавляющей части КА «Starlink» — около 550 км [<https://www.space-track.org/#catalog>], в связи с чем они вносят помехи в принимаемый на ИРНР высотный профиль сигнала некогерентного рассеяния, что затрудняет его обработку и последующее восстановление высотного профиля электронной концентрации ионосферы.

В течение 4 лет (с конца 2019 по 2023 гг.) с помощью ИРНР проводилась радиолокация КА этой группировки совместно с зондированием ионосферы. Анализ мощности принятого радиолокационного (РЛ) сигнала, выявление особенностей его суточной динамики могут в дальнейшем способствовать разработке метода

нивелирования помех, вносимых этими спутниками в сигнал некогерентного рассеяния.

Цель работы — выявление и анализ суточной динамики КА «Starlink» по данным ИРНР.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Радиолокация спутников рассматриваемой группировки на ИРНР проводилась в течение четырёх лет, с 10.12.2019 г. по 20.10.2023 г. За рассматриваемый период радар отработал 184 сут. В качестве целей выбирались КА с близкими координатными характеристиками: наклонение орбиты — 53°, высота орбиты — ~552 км, пролетающие в области центра сектора сканирования [Лебедев и др., 2022]. Т. к. совместно с радиолокацией проводятся измерения параметров ионосферной плазмы [Алсаткин и др., 2020] (данные этих измерений использовались для анализа), в режиме радиолокации ИРНР работал каждые 5 мин. В качестве модели геомагнитного поля использовалась «JGRF-13» [Alken et al., 2021].

Существует несколько версий КА «Starlink» [<https://space.skyrocket.de/>] (табл. 1). Всего ИРНР регистрировал КА «Starlink» 52105 раз за указанный период измерений. Как видно из таблицы, в основном это КА версий «v1.0» и «v1.5», поэтому анализироваться будут именно они. Основное их отличие — в массе: у версии «v1.5» она больше из-за наличия лазерной межспутниковой линии связи [Пехтерев, 2022].

Таблица 1.

Сравнительные характеристики версий КА «Starlink»

Версия	Масса, кг	Орбита	Первый запуск	Зарегистрировано на ИРНР раз
v0.9	227	550 км × 550 км, 53° (типичная)	Май 2019	472
v1.0	~260	550 км × 550 км, 53° (типичная)	Ноябрь 2019	43 882
v1.5	~300	550 км × 550 км, 53° (типичная)	24.01.2021	7 735
v2.0	~1 250	550 км × 550 км, 53° (типичная)	27.02.23	0
v2.0 Mini	~750	550 км × 550 км, 53° (типичная)	19.04.2023	16

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для анализа привлекались следующие результаты измерений: мощность РЛ сигнала КА, дальность и углы прихода, электронная концентрация ионосферы, измеряемая методом некогерентного рассеяния. Мощность РЛ сигнала ($P_{пр}$) от КА определяется так:

$$P_{пр}(\vec{R}) = \frac{P_{изл}\lambda^2 G^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma(\vec{R}) \cos^2(\Omega(\vec{R})), \quad (1)$$

где $P_{изл}$ — мощность излучённого сигнала, \vec{R} — радиус-вектор цели (в СК ИРНР), λ — длина волны сигнала, G — коэффициент усиления антенны, σ — эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели, Ω — угол поворота большой полуоси эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея при распространении от радара до цели и обратно:

$$\Omega(\vec{R}) = \frac{q_e^3}{c\epsilon_0 m_e^2 \omega^2} \int_0^{\vec{R}} N_e(\vec{r}') |\vec{B}(\vec{r}')| \cos(\alpha(\vec{r}')) d\vec{r}' \quad (2)$$

где q_e — элементарный заряд, c — скорость света в вакууме, ϵ_0 — электрическая постоянная, m_e — масса электрона, ω — рабочая циклическая частота сигнала, $N_e(\vec{r}')$ — электронная концентрация вдоль луча зрения, $\vec{B}(\vec{r}')$ — геомагнитная индукция, $\alpha(\vec{r}') = \vec{r}' \vec{B}$.

Среднесуточная динамика мощности (1) строится следующим образом: за каждые сутки, в которые проводилась радиолокация, вычисляются усреднённые отчёты мощности за эти сутки с заданным шагом усреднения; затем за каждый отсчёт времени, соответствующий выбранному шагу усреднения, производится усреднение мощности по отсчётам в этот момент времени за все исследуемые сутки.

В формуле (1) можно учесть тот факт, что спутники группировки «Starlink» регистрируются на ИРНР под примерно одними и теми же углами и на одних и тех же дальностях и частотах, и тогда эти параметры и зависящие от них величины можно исключить из усреднения. Таким образом, среднесуточная динамика мощности пропорциональна ЭПР спутника и квадрату косинуса угла поворота эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея. Известно, что спутник группировки «Starlink» состоит из двух плоских частей, пересекающихся под прямым углом: прямоугольной панели с солнечными батареями и панели практически прямоугольной формы со всеми остальными компонентами КА [Пехтерев, 2022]. В течение суток КА меняет свою ориентацию в соответствии с ходом Солнца. Вследствие этого можно предположить, что ЭПР такого спутника имеет чётко выраженную суточную динамику. Тогда

формула среднесуточной динамики мощности примет вид:

$$\bar{P}(t_j) \sim \overline{\sigma(t_j) \cos^2(\Omega)_j}, \quad (3)$$

где t_j — узел сетки усреднения, $j = \overline{0, N-1}$, N — количество отсчётов среднесуточной динамики, $\cos^2(\Omega)_j$ — среднесуточная динамика квадрата косинуса угла поворота эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея (является почти постоянной).

Для проверки этого предположения вычислялся по аналогичной методике среднесуточный ход фазового угла β — угла между радиус-вектором (в СК ИРНР) КА и вектором, направленным от КА на Солнце (рис. 1). Данный угол вычислялся так:

$$\beta = \arccos\left(\frac{\vec{r}_s(\vec{r}_\odot - \vec{r}_s)}{|\vec{r}_s| |\vec{r}_\odot - \vec{r}_s|}\right), \quad (4)$$

где \vec{r}_s — радиус-вектор спутника, \vec{r}_\odot — радиус-вектор Солнца.

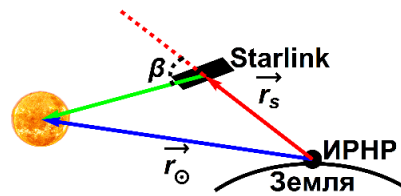


Рис. 1. Схема расчёта фазового угла

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 на среднесуточные динамики мощности принятого РЛ сигнала (формулы (2), (3)) от КА «Starlink» версий «v1.0» и «v1.5» наложена среднесуточная динамика квадрата косинуса фазового угла с Солнцем (формула (4)). Видно, что для обеих версий среднесуточная динамика имеет два выраженных пика: дневной (в 07:30 UT) и ночной (в 19:30 UT), как и среднесуточная динамика квадрата косинуса фазового угла (только у неё они сдвинуты на час назад). У версии «v1.5» дневной пик разделён на два. Времена пиков среднесуточной динамики мощности в целом соответствуют временам пиков среднесуточной динамики квадрата косинуса фазового угла, что подтверждает предположение о том, что суточная динамика мощности РЛ сигнала обусловлена ходом Солнца. Это свидетельствует о том, что КА «Starlink» действительно меняет свою ориентацию в пространстве в зависимости от времени суток в соответствии с направлением на Солнце, а это, в свою очередь, приводит к изменению ЭПР — ЭПР КА «Starlink» имеет суточный ход.

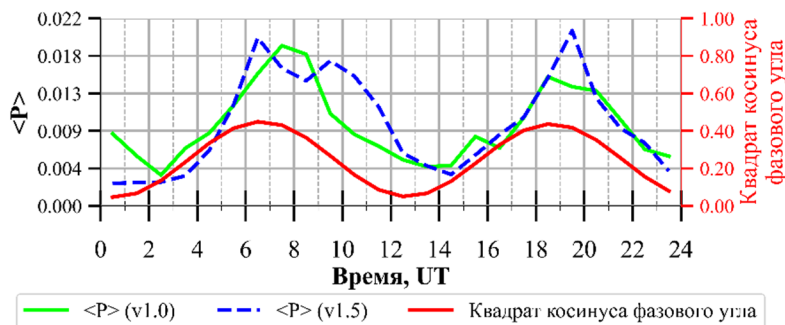


Рис. 2. Сравнение среднесуточных динамик мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы данные ИРНР по принятой мощности РЛ сигнала от КА «Starlink» с 2019 по 2023 гг. В основном регистрировались КА версий «v1.0» и «v1.5». Для них построены среднесуточные динамики мощности. Они имеют два ярко выраженных пика: дневной (в 07:30 UT) и ночной (в 19:30 UT). У версии «v1.5» дневной пик разделён на два. Сравнение этих динамик со среднесуточной динамикой квадрата косинуса фазового угла показывает, что такой бимодальный вид суточной динамики мощности РЛ сигнала обусловлен суточным ходом Солнца (спутник поворачивается в зависимости от направления на Солнце), и в результате ЭПР КА «Starlink» также меняется и имеет суточный ход.

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.

Лебедев В.П., Сетов А.Г., Ермаков В.Ю. Антенна Иркутского радара некогерентного рассеяния: математическая модель, методы калибровки // Мат-лы

Всероссийской открытой науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», Муром, 28–30 июня 2022 г. С. 527–537. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-527-537.

Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255.

Alken P., Thébault E., Beggan C.D. et al International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. 2021. V. 73, iss. 49. DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.

Gallozzi S., Scardia M., Maris M. Concerns about ground based astronomical observations: a step to safeguard the astronomical sky // Instrumentation and Methods for Astrophysics 2020. arXiv:2001.10952

Grigg D., Tingay S.J., Sokolowski M. et al. Detection of intended and unintended emissions from Starlink satellites in the SKA-Low frequency range, at the SKA-Low site, with an SKA-Low station analogue // Astronomy & Astrophysics. 2023. V. 678. L6. DOI: 10.1051/0004-6361/202347654.

URL: <https://www.space-track.org/#catalog> (дата обращения 30.05.2024).

URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink> (дата обращения 30.05.2024).

URL: <https://space.skyrocket.de/> (дата обращения 30.05.2024).