

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПР СПУТНИКОВ ГРУППИРОВКИ STARLINK ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Российской Федерации, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.126А, а/я 291
E-mail: ivonin1480@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа данных о радиолокации спутников группировки Starlink с помощью Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) с 2019 по 2024 годы. Подтверждено предположение о связи суточного хода ЭПР КА Starlink с фазовым углом на Солнце.

Ключевые слова: Starlink; эффективная площадь рассеяния; радиолокация; фазовый угол; эффект Фарадея; ионосфера; радиолокационный сигнал

STUDY OF THE RCS OF THE STARLINK CONSTELLATION SATELLITES USING THE IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR DATA

V.A. Ivonin, V.P. Lebedev

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 2024. An assumption about the coupling between the diurnal dynamics of the Starlink RCS and the phase angle on the Sun has been confirmed.

Keywords: Starlink; radar cross section; radiolocation; phase angle; Faraday effect; ionosphere; radar signal

Введение

На сегодняшний день низкоорбитальная спутниковая группировка Starlink состоит из около 8 600 космических аппаратов (КА) [1], и это число стремительно увеличивается. SpaceX планирует вывести на орбиту примерно 12 000 КА с возможным расширением до 34 400 [2]. Даже при текущем размере созвездия оно порождает проблемы для оптической [3] и радиоастрономии [4]. С помощью ИРНР (52,8811° С.Ш., 103,256° В.Д.) осуществляют исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) и определяют параметры ионосферной плазмы до высот около 700 км, тогда как высота орбиты большинства КА Starlink — около 550 км [1]. Из-за пересечения области зондирования ионосферы и траектории полёта спутников в принимаемом радаром сигнале НР возникают искажения его мощности, что затрудняет его обработку и последующее восстановление высотного профиля электронной концентрации ионосферы. На рис. 1 показан пример суточной высотно-временной динамики регистрируемой на ИРНР мощности сигнала НР. Параллельная оси абсцисс белая линия на наклонной дальности около 585 км есть отражённый от КА Starlink паразитный сигнал.

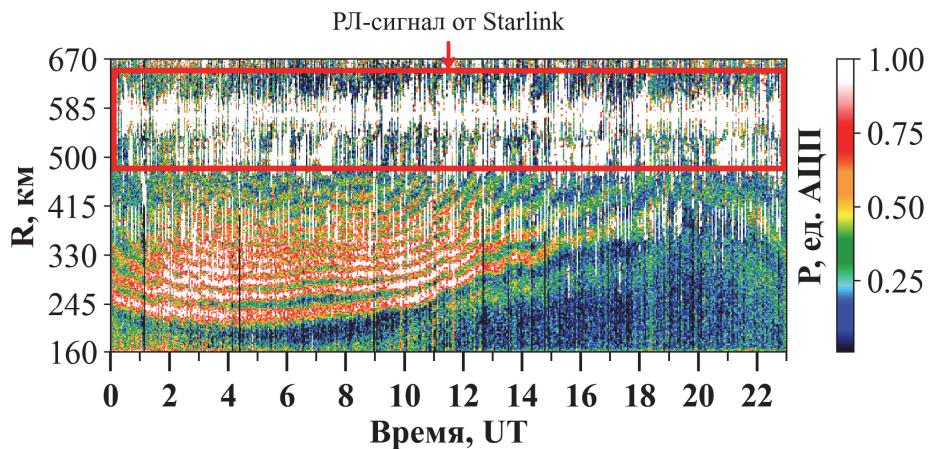


Рис. 1. Высотно-временная динамика регистрируемой на ИРНР мощности сигнала НР

В течение практически пяти лет (с конца 2019 по середину 2024) на ИРНР совместно с зондированием ионосферы производили радиолокацию KA Starlink. Посредством анализа мощности принятого РЛ-сигнала с учётом состояния фоновой ионосферы разработана методика оценки эффективной площади рассеяния (ЭПР) спутника группировки Starlink, которая в дальнейшем может помочь в устранении помех сигнала НР.

Постановка эксперимента

Радиолокация спутников Starlink на ИРНР проводилась в течение практически пяти лет, с 23.10.2019 по конец 2024. За этот период ИРНР отработал 234 суток. В качестве целей выбирались КА с близкими координатными характеристиками: наклонение орбиты — 53°, высота орбиты — ~552 км, пролетающие в области центра сектора сканирования [5]. Т.к. совместно с радиолокационными проводятся измерения параметров электронной концентрации ионосферы [6] (данные этих измерений использовались для анализа), в режиме радиолокации ИРНР работал каждые 5 минут. В качестве модели геомагнитного поля использовалась «IGRF-13» [7].

Существует несколько версий КА «Starlink» [8] (см. табл. 1). Всего ИРНР зарегистрировал КА «Starlink» 63 074 раза 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 [9].

Таблица 1. 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	494
v1.0	~260		Ноябрь 2019	48 319
v1.5	~300		24.01.2021	13 728
v2.0	~1 250		27.02.23	0
v2.0 Mini	~750		19.04.2023	533

Методика обработки данных

Применяемые результаты измерений: мощность РЛ-сигнала КА, дальность и углы прихода, электронная концентрация ионосферы. Мощность РЛ сигнала (P_{np}) от КА:

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

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

$$\Omega(\vec{R}) = \frac{q_e^3}{c\varepsilon_0 m_e^2 \omega^2} \int_0^{\vec{R}} N_e(\vec{r}') |\vec{B}(\vec{r}')| \cos(\alpha(\vec{r}')) d\vec{r}', \quad (2)$$

где q_e — заряд электрона, 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, $\alpha(\vec{r}') = \vec{r}' \cdot \vec{B}$.

В формуле (1) нужно учесть, что КА Starlink регистрируются под примерно одинаковыми углами и на одинаковых дальностях и частотах, тогда эти параметры и зависящие от них величины можно исключить из усреднения. Следовательно среднесуточная динамика мощности пропорциональна ЭПР спутника и квадрату косинуса угла поворота эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея. КА «Starlink» состоит из двух плоских частей, пересекающихся под прямым углом: прямоугольной панели с солнечными батареями и практически прямоугольной панели с компонентами КА [9]. В течение суток КА меняет свою ориентацию в соответствии с ходом Солнца. Из этого вытекает предположение: ЭПР КА 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 рассчитан среднесуточный ход фазового угла β (угла между радиус-вектором КА (\vec{r}_s) и вектором, направленным от КА на Солнце с радиус-вектором \vec{r}_{\odot} (рис. 2)):

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

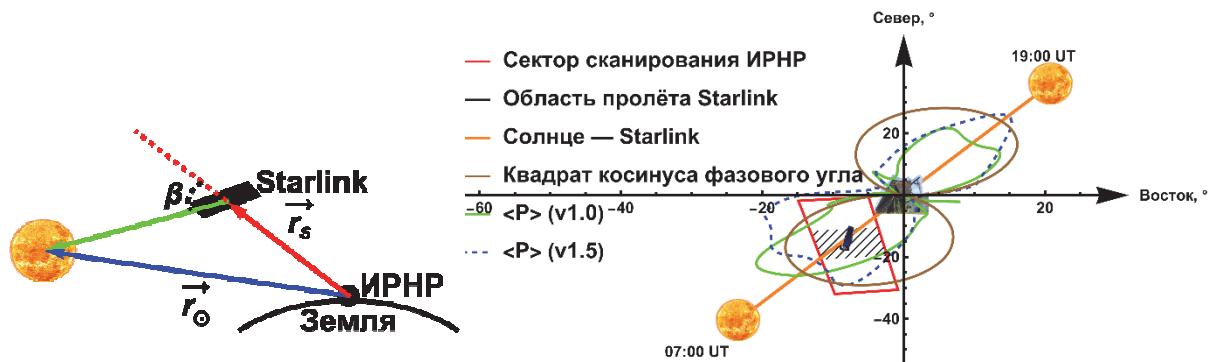


Рис. 2. Схема расчёта фазового угла (слева) и его и РЛ-сигнала среднесуточных динамик (справа)

Результаты анализа

На рис. 3 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 06:30 UT для «v1.5» и в 07:30 UT для «v1.0») и ночной (в 19:30 UT для «v1.5» и в 18:30 UT для «v1.0»), как и среднесуточная динамика квадрата косинуса фазового угла. Время дневного пика среднесуточной динамики квадрата косинуса фазового угла совпадает со временем дневного пика «v1.5», а время ночного — со временем ночного «v1.0», и это соответствует гипотезе о том, что суточная динамика мощности РЛ сигнала от КА Starlink обусловлена ходом Солнца. Таким образом, спутники группировки Starlink действительно меняют свою ориентацию в пространстве в зависимости от времени суток, учитывая направление на Солнце, что приводит к изменению ЭПР, придавая ей суточный ход.

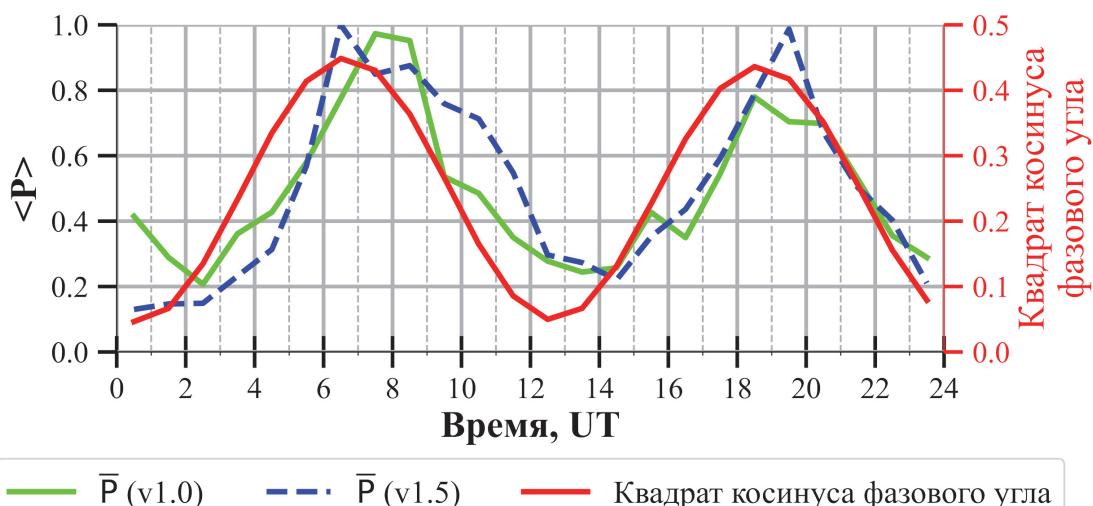


Рис. 3. Сравнение среднесуточных динамик мощности

Заключение

Проведён анализ принятой ИРНР мощности РЛ-сигнала от КА Starlink с 2019 по 2024 годы. Подавляющее большинство зарегистрированных КА оказались версий «v1.0» и «v1.5», в связи с чем именно для них построены среднесуточные динамики мощности. Они имеют два ярко выраженных пика: дневной (в 06:30 UT для «v1.5» и в 07:30 UT для «v1.0») и ночной (в 19:30 UT для «v1.5» и в 18:30 UT для «v1.0»). У версии «v1.5» дневной пик более широкий, чем ночной, и имеет локальные максимумы. Сравнение полученных динамик со среднесуточной динамикой квадрата косинуса фазового угла подтверждает гипотезу о том, что этот бимодальный вид обусловлен суточным ходом Солнца (КА изменяет ориентацию в соответствии с направлением на Солнце), что придаёт ЭПР КА «Starlink» суточный ход. В последние годы на орбиту выводятся КА версии «v2.0 Mini», и уже сейчас их число составляет 45% от всего количества КА Starlink на орбите, что предоставляет материал для дальнейших исследований по данному направлению.

Благодарности

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» <http://ckr-rf.ru/usu/77733/>. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-Г3/Ц3569/278).

Список литературы

1. Space-Track. – URL: <https://www.space-track.org/#catalog> (дата обращения: 15.05.2025).
2. Starlink – Wikipedia. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink> (дата обращения: 15.05.2025).
3. Gallozzi, S., Scardia, M., and Maris, M. 2020. Concerns about ground based astronomical observations: a step to safeguard the astronomical sky. <https://arxiv.org/pdf/2001.10952.pdf>.
4. Grigg D., Tingay S.J., Sokolowski M., Wayth R.B., Indermuehle B., and Prabu S. 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. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347654>.
5. 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. <https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-527-537>.
6. Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности метода восстановления N_e на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 97–110. <https://doi.org/10.12737/szf-61202009>.
7. Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. – 2021. – V. 73. – Iss. 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>.
8. Gunter's Space Page. – URL: <https://space.skyrocket.de/> (дата обращения: 15.05.2025).
9. 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. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-4-190-255>.