

УДК 621.396.967

ВОЗМОЖНОСТЬ МОНИТОРИНГА ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Бабкин Ю. В., Якубовский С. В.

MONITORING OF SPACE OBJECTS IN MEDIUM EARTH ORBIT
WITH EARLY-WARNING RADAR

Babkin Yu. V.* , Yakubovsky S. V.**

* Joint Stock Company “Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute”, Moscow, 127083, Russia

** SRC “Kosmos”, MoD, Moscow, 129345, Russia

e-mail: yubabkin@gmail.com

Abstract. The early-warning radar opportunity in an artificial satellite in medium Earth orbit surveillance is observed. The nowadays Russian early-warning radars provide long distance monitoring in purpose to track space apparatuses. In comparison with telescope observations, radar observations are not limited by weather conditions and the daylight presence, so advantages are obvious. Moreover, radars allow to get not only angular coordinate measurements, but also distance and radial velocity measurements. However, the radar operating distance is usually limited by several thousands kilometers, so it is possible to track only satellites in low Earth orbit. But by means of some additional measures it could be achieved to track satellite in medium Earth orbit. The amount of those measures, defined as special operating mode, is represented. The main difficulty, that is discussed, is in large distance between satellite and radar. The value of the semiaxis of the objects under consideration can be up to 40,000 kilometers. The radiated electromagnetic field energy decreases as the square of distance that radiowave overcomes. So when the transmitted radar signal is reflected from satellite, the received echo signal level is deep under receiver noise. The most common way to increase signal-to-noise ratio is in transmitted signal duration increasing.

Keywords: medium Earth orbit (MEO), satellite, space object, observation, measurement, detection, radiolocation, radar, space debris, space surveillance.

Введение

С момента начала освоения человечеством космического пространства происходит постоянный рост количества искусственных спутников Земли (ИСЗ). Отработавшие свой ресурс, не функционирующие спутники остаются на орбитах в околоземном космическом пространстве почти навсегда, только небольшая часть низких спутников, подвергаясь торможению в верхних слоях атмосферы, со временем сходит с орбиты. Неконтролируемый рост количества техногенных объектов в околоземном пространстве повышает вероятность столкновения ИСЗ между собой, опасность для новых космических миссий, в том числе и пилотируемых полётов, и в перспек-

тиве может сделать невозможным запуски новых космических аппаратов.

Проблемой каталогизации объектов на околоземных орбитах занимаются Российские и Американские системы контроля космического пространства (СККП). Количество каталогизированных объектов в настоящее время составляет около 17 тыс. Этими космическими объектами (КО) в основном являются действующие и отработавшие свой ресурс ИСЗ, разгонные ступени ракет, операционные фрагменты, остатки от столкновений ИСЗ.

Среди космических объектов особое место занимают высокоорбитальные космические объекты (ВОКО), в настоящей статье под такими объектами будут пониматься объекты, высота орбиты которых в апогее составляет более 10 тыс. км. В отличие от более

Бабкин Юрий Владимирович, инженер-программист ОАО «РТИ»; e-mail: yubabkin@gmail.com

Якубовский Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доцент, начальник отдела Научно-исследовательского испытательного центра Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: syakubovskiy@mail.ru

низких КО, эти объекты остаются на орбите практически навсегда. Основными средствами наблюдения ВОКО являются оптические комплексы. Радиолокационные наблюдения ВОКО имеют несколько преимуществ над оптическими. Во-первых, возможность наблюдения в любое время суток и при любых погодных условиях. Во-вторых, радиолокационные станции (РЛС) позволяют измерять радиальную дальность до ВОКО, что нельзя осуществить оптическими наблюдениями. Радиолокационные измерения дальности совместно с оптическими наблюдениями могут существенно улучшить точность определения параметров орбиты ВОКО.

1. Цель работы

Целью настоящей статьи является анализ возможности радиолокационных наблюдений и определения параметров орбит высокоорбитальных космических объектов (ВОКО).

Для того что бы показать специфику и проблемы, связанные с радиолокацией ВОКО, будут кратко рассмотрены основные характеристики радиолокационных станций и принципы их работы по искусственным спутникам Земли в штатном режиме. Режим наблюдения ВОКО рассматривается как особый режим работы РЛС отличающийся от штатного режима наблюдения низких искусственных спутников Земли.

Проведена оценка перспектив вклада радиолокационных наблюдений ВОКО в каталогизацию околоземных космических объектов. Используя каталоги КО показано количество объектов, доступных наблюдениям РЛС. Приводятся ожидаемые точности получаемых измерений положения объектов.

2. Общие сведения о РЛС дальнего обнаружения

В настоящее время в России ведётся строительство новых современных радиолокационных станций. В статье рассматриваются радиолокационные станции дальнего обнаружения работающие в метровом диапазоне радиоволн, и имеющих большое расстояние обнаружения объектов. Станции работают в интересах системы контроля космического пространства (СККП). Рассматриваемым станциям доступен для наблюдения сектор пространством размером около сотни градусов по азимуту и несколько десятков градусов

по углу места. Дальность работы таких станций составляет несколько тысяч километров.

В современных РЛС в качестве антенн обычно применяют активную фазированную антенную решетку. Главная особенность таких антенн — возможность электронного управления направлением зондирующего луча. Это позволяет быстро переключаться к осмотру пространства в произвольном заданном направлении.

3. Работа РЛС в интересах СККП, мониторинга действующих ИСЗ и космического мусора

Основной задачей работы РЛС в интересах СККП является поиск низкоорбитальных искусственных спутников Земли, движущихся на высотах до 2000–3000 км, и определение их параметров орбиты. Такая работа ведётся по следующим правилам:

- поиск ИСЗ в барьерных зонах (зонах непрерывного сканирования) ведётся непрерывно, с последующим сопровождением и определением параметров орбиты ИСЗ;

- для определения параметров орбит низких ИСЗ длительность наблюдения ИСЗ должна составлять, примерно, полторы минуты;

- рассчитанные по результатам наблюдений параметры орбиты ИСЗ используются СККП;

- возможен специальный поиск ИСЗ по целеуказаниям, сформированным СККП;

- так же радиолокационные средства позволяют проводить наблюдения ИСЗ на протяжении всего времени его прохождения через сектор станции. Длительность такого наблюдения достигает 15–20 мин.

Количество наблюдаемых ИСЗ одной радиолокационной станцией за сутки достигает нескольких тысяч.

4. Особенности работы РЛС по ВОКО

Вышеописанные принципы работы РЛС предназначены для проведения наблюдений спутников с высотой полёта до 2000–3000 км над поверхностью Земли, обнаруживаемых на дальности до 5000–7000 км от станции. Для наблюдения ВОКО радиолокационные станции должны работать по другим алгоритмам, с учётом специфики радиолокационных наблюдений объектов на большей дальности. Наблюдения ВОКО не являются основной задачей для этих станций. Режим ВОКО орга-

низовывается на несколько иных принципах и логике работы, по причинам, которые будут рассмотрены ниже.

Основные особенности радиолокации ВОКО по сравнению с радиолокацией объектов в штатном режиме работы рассматриваемых РЛС:

– большая удалённость объекта, вплоть до 40 000 км. Это означает, что дальность до наблюдаемого объекта увеличивается на порядок.

– с увеличением высоты движения космического объекта уменьшается как пространственная скорость движения объекта, так и угловая скорость движения объекта по небесной сфере. Этот аспект заставляет иначе подойти к методике нахождения параметров орбиты объекта. Для уверенного определения орбиты требуется получить измерений пространственного положения объекта на как можно большей длине дуги орбиты.

Рассмотрим эти особенности наблюдения ВОКО подробнее.

4.1. Необходимость когерентного накопления сигналов.

Согласно уравнению дальности радиолокации при увеличении расстояния до зондируемого объекта мощность эхо-сигнала падает пропорционально четвёртой степени. Предполагаемая дальность работы по ВОКО в несколько раз превышает штатную дальность работы радара. Поэтому главная сложность работы РЛС по ВОКО заключается в очень низкой мощности принимаемого отраженного сигнала. Для увеличения энергии отраженного сигнала на фоне шума становится необходимым применение более длинных сигналов, а так же пачечных сигналов с возможностью когерентного суммирования импульсов. При росте дальности до объекта, либо при уменьшении ЭПР (эффективной площади рассеяния) объекта требуется использовать большее количество импульсов в пачке (до 100 и более). В свою очередь увеличение количества импульсов в пачке увеличивает время получения одного измерения до нескольких секунд. В настоящее время при построении РЛС отсутствует опыт применения когерентного накопления пачечных сигналов большой длины.

4.2. Длительность периода наблюдения объектов

Для наилучшего определения параметров орбиты наблюдаемого объекта измерения должны быть максимально разнесены между собой по времени, чтобы охватить большую дугу орбиты объекта. С увеличением высоты объекта его угловая и пространственная скорость движения уменьшаются.

Размеры сектора работы станции таковы, что охватывают несколько десятков градусов дуги орбиты объекта. Максимальное время нахождения космического объекта в секторе доступным наблюдениям составляет 10–15 мин. для низких спутников. С увеличением большой полуоси длительность нахождения ИСЗ в секторе растёт и составляет уже несколько часов для произвольного объекта на высокой орбите со значением большой полуоси 20–40 тыс. км. Для геостационарных ИСЗ, находящихся в секторе станции и доступных для наблюдения возможно постоянное получение измерений. Частота наблюдения ВОКО может быть выбрана исходя из угловой скорости движения, получение одного измерения может приходиться на прохождение спутником угловой дуги в несколько градусов по небесной сфере.

5. Возможность поиска ВОКО средствами РЛС

Для рассматриваемого класса РЛС область космического пространства, осматриваемого при однократном зондировании имеет форму цилиндра и имеет сравнительно небольшие размеры. Диаметр этого цилиндра составляет несколько градусов, высота цилиндра до нескольких сот километров. С учётом того, что длительность одного зондирования может достигать нескольких секунд временного ресурса РЛС, поиск ВОКО в большом объёме пространства становится невозможным. Наблюдения ВОКО должны проводиться по заранее известным целеуказаниям — вектору положения аппарата в пространстве и вектору его скорости.

Следует ожидать, что точность измерений координат положения ВОКО радиолокационными средствами составит несколько минут по угловым мерам сферической системы координат и до нескольких сот метров по измеряемому расстоянию.

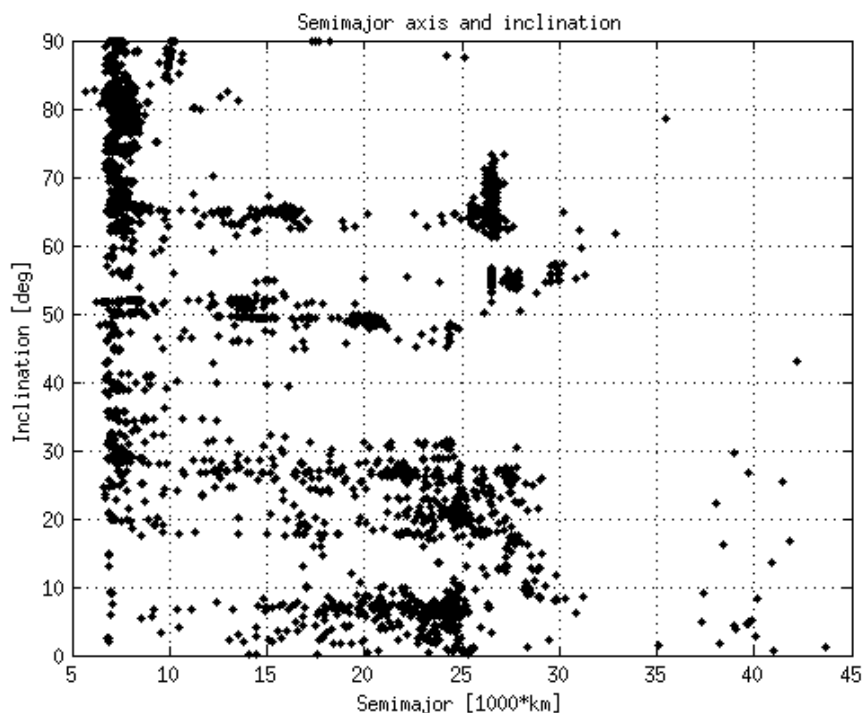


Рис. 1. Распределение известных космических объектов по значениям большой полуоси и наклону орбиты

Совместная обработка радиолокационных и оптических наблюдений может дать лучшие точности определения параметров орбиты ВОКО.

6. Необходимость специального режима работы «ВОКО»

Как не раз отмечалось выше, наблюдение ВОКО требует большого временного и энергетического ресурса радиолокационной станции. Это делает невозможным одновременное наблюдение ВОКО и выполнение основной задачи РЛС — поиск и сопровождение объектов на низких орбитах. Систематизируя всё вышеотмеченное, можно сформулировать следующие ограничения и правила для алгоритмов наблюдения ВОКО:

- создание специального режима ВОКО. Основная задача РЛС останавливается, останавливается поиск, сопровождение и определения параметров орбит низких ИСЗ;

- наблюдение каждого ВОКО происходит по иным алгоритмам, нежели наблюдения низких ИСЗ. Основное отличие: длительное сопровождение ВОКО с существенно более низкой частотой получением измерений;

- в качестве зондирующего радиосигнала используется радиоимпульсов радиоимпульсов с большой общей длительностью;

- количество одновременно наблюдаемых ВОКО выбирается исходя из текущей загруженности станции;

- невозможен поиск ВОКО в большом объеме пространства. Наблюдения ВОКО должны проводиться по точным целеуказаниям от СККП;

- для уверенного и точного определения параметров орбиты ВОКО требуются измерения, максимально разнесённые друг от друга по времени. Для отдельных аппаратов длительность сопровождения должна составлять несколько часов.

7. Количественные оценки доступных для наблюдения ВОКО

Можно условно выделить три основных группы ВОКО:

- 1) геостационарные КО;
- 2) КО на высокоэллиптических орбитах (аппараты, находящиеся на орбитах типа «Молния», «Тундра»);

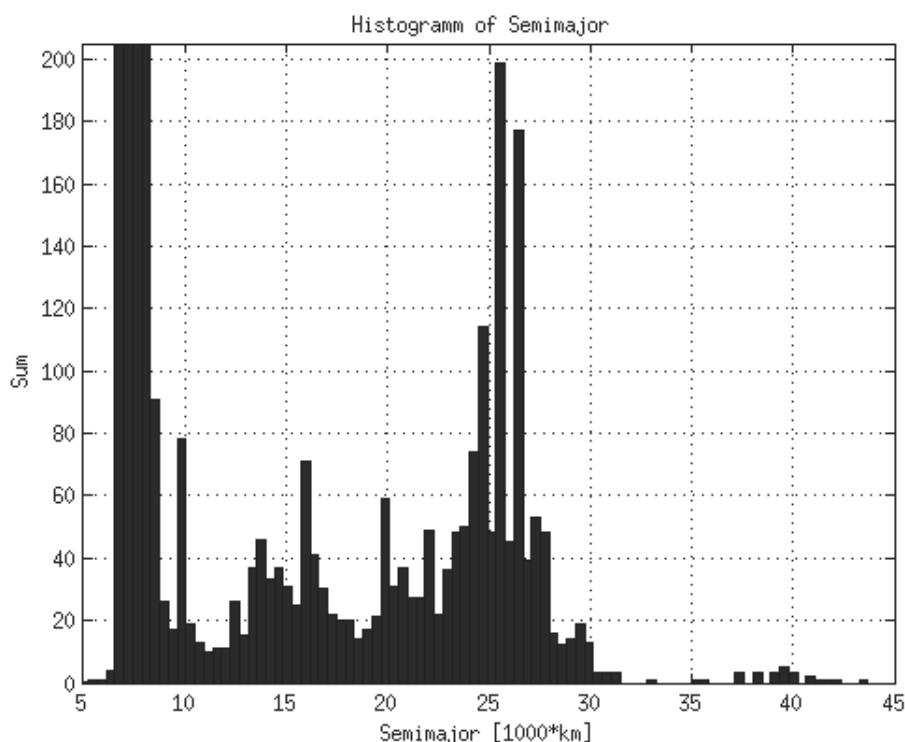


Рис. 2. Гистограмма распределения количества КО в зависимости от значения большой полуоси

3) навигационные космические аппараты (системы ГЛОНАСС, Navstar, Galileo и прочие).

По данным каталога NORAD была проведена оценка числа доступных для наблюдений аппаратов, исходя из параметров орбит. На рис. 1 показано распределение каталогизированных объектов по значениям большой полуоси и наклона орбиты. Для РЛС с сектором работы обращенным в северном направлении в силу геометрического фактора для наблюдения доступны только космические объекты с достаточно большим углом наклона орбиты. Для РЛС находящихся в средних широтах и имеющих южное направление сектора работы доступны для наблюдения все объекты с величиной большой полуоси больше 10 000 км. На рис. 2 представлена гистограмма распределения каталогизированных объектов по значению большой полуоси. Гистограмма наглядно показывает количество объектов доступных для наблюдения в режиме ВОКО.

Заключение

В статье кратко рассмотрена возможность наблюдения ВОКО средствами РЛС.

Такие наблюдения имеют ряд преимуществ перед оптическими наблюдениями. Наблюдения ВОКО должны проводиться в особом режиме работы РЛС, отличительными особенностями которого является работа в эфире пачками большого количества импульсов с когерентным (или комбинированным) накоплением сигнала. Как таковой поиск ВОКО средствами РЛС в больших объемах пространства невозможен. Работа по ВОКО должна вестись по целеуказаниям от СККП.

Литература

1. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2013, 216 с.
2. Вениаминов С. С., Червонов А. М. Космический мусор угроза человечеству. М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2012, 190 с.
3. Урмаев М. С. Орбитальные методы космической геодезии. М.: Недра, 1981, 256 с.
4. Саврасов Ю. С. Алгоритмы и программы в радиолокации. М.: Радио и связь, 1985, 216 с.
5. Каула В. М. Спутниковая геодезия. М.: Мир, 1970, 172 с.

References

1. Nazarenko A. I. *Modelirovanie kosmicheskogo musura* [Space debris modeling]. Moscow, IKI RAN,

-
- 2013, 216 p.
2. Veniaminov S. S., Chervonov A. M. *Kosmichesky musor ugroza chelovechestvu* [Space debris is a threat to humanity]. Moscow, IKI RAN, 2012, 190 p.
 3. Urmaev M. S. *Orbital'nye metody kosmicheskoy geodezii* [Orbital methods of space geodesy]. Moscow, Nedra, 1981, 256 p.
 4. Savrasov Yu. S. *Algoritmy i programmy v radi-olokatsii* [Algorithms and programs in radar]. Moscow, Radio i svyaz, 1985, 216 p.
 5. Kaula V. M. *Sputnikovaya geodeziya* [Satellite geodesy]. Moscow, Mir, 1970, 172 p.

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Бабкин Ю. В., Якубовский С. В., 2017

Статья поступила 30 октября 2017 г.