

(ДТОО «Астрофизический институт им. Фесенкова», Алматы, Республика Казахстан)

НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ В ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ЗОНЕ

Аннотация. На основе статистического анализа каталога орбит геостационарных спутников (ГСС) установлено, что среднесуточное количество сближений ГСС $n(R)$ при небольших расстояниях R хорошо описывается степенной функцией $n(R) = c \cdot R^b$, где c , b – постоянные. Используя эту зависимость, сделана оценка частоты опасных сближений ГСС.

Ключевые слова: статистический анализ, околоземное космическое пространство, сближение.

Тірек сөздер: статистикалық талдау, жер төңірегіндегі ғарыштық кеңістік, жақындасу.

Keywords: statistical analysis, circumterrestrial space, rapprochement.

Современное состояние околоземного космического пространства (ОКП) вызывает естественную озабоченность всех организаций и служб, работающих в этой области. Основная проблема – неконтролируемый рост «запасов» космического мусора (КМ), который представляет реальную угрозу для работающих аппаратов. Согласно информации, предоставленной [T. S. Kelso](#) [1], наземными службами слежения на околоземных орбитах зарегистрированы 38154 объекта, из них работающими являются лишь 1048, все остальное – космический мусор (состояние на 13 апреля 2012 г.).

Рост населения геостационарных орбит (ГСО) происходит за счет запуска новых спутников (старые, исчерпавшие ресурсы, остаются на орбите), взрывов и столкновений активных и пассивных КА между собой и с фрагментами КМ. Кроме наблюдаемых объектов, на ГСО и в ее окрестностях движутся десятки тысяч малоразмерных фрагментов КМ, которые не удается зарегистрировать современными наземными средствами. С течением времени их количество возрастает, соответственно, возрастает и вероятность столкновений.

Для того чтобы оценить масштабы загрязнения, [2]. В качестве источников информации в них, как правило, используются результаты наземных наблюдений ГСС (каталоги), зарегистрированные данные о характеристиках спутников, запусках, столкновениях и разрушениях на орбитах. Очевидно, что для создания адекватной модели надо иметь надежную теорию движения ГСС, с помощью которой можно было бы представить имеющиеся наблюдения и орбитальные элементы на длительных интервалах

времени. Необходимо также разработать программное обеспечение, способное достаточно быстро вычислять эволюцию десятков и сотен фрагментов.

Линейная абсолютная скорость движения типичного ГСС составляет 3.075 км/сек, относительная скорость (она же – скорость взаимного сближения или удаления) может достигать половины этой величины, то есть 1.5 км/сек, или превышать ее. Понятно, что на таких скоростях даже легкое касание может привести к разрушению спутников. Но даже если фактического столкновения не происходит, то слишком тесное сближение двух активных ГСС может нарушить нормальное функционирование любого из них, например, из-за взаимных радиопомех. Поэтому анализ опасных сближений (до 25 км, [3]) спутников в геостационарной зоне является достаточно актуальной задачей.

В данной работе мы провели оценку частоты опасных сближений ГСС на предельно малых расстояниях (вплоть до нескольких метров). Для расчетов использовался обобщенный каталог ГСС, содержащий орбитальные данные примерно для 1500 ГСС на март 2012 г., [4-6]. В нем активные (управляемые) спутники составляют 1/4 часть, 3/4 – это неуправляемые, в том числе и крупные фрагменты космического мусора.

Вычисления положения объектов проводились в геоцентрической экваториальной системе координат. В данном случае мы полагали, что управляемые (корректируемые, или активные) ГСС подчиняются тем же законам, что и неуправляемые (пассивные) спутники. Для ускорения расчетов использовалась упрощенная теория движения, в которой учитываются только гравитационные возмущения в долготе ГСС (именно эти резонансные возмущения порождают уникальный класс объектов – либрационные ГСС). Понятно, что при таком подходе точность расчета конкретного парного сближения ГСС будет низкой, особенно на больших интервалах времени. Однако можно надеяться, что глобальные статистические параметры достаточно хорошо отражают реальную ситуацию.

В рамках принятой модели движения погрешность вычисления моментов сближения ГСС составляла около 1.0–1.5 мсек, а ошибка соответствующих взаимных расстояний – около 2-х метров. Расчеты были выполнены на интервале 1080 суток (т. е. примерно 3 года), 540 суток до средней даты элементов, и столько же после этой даты. Фиксировались все парные сближения ГСС вплоть до расстояний 200 км. Общее количество минимальных сближений до этого расстояния за 3 года составило более 1.7 млн. Суммарное время непрерывного счета на современных ПК среднего класса – около 30 часов.

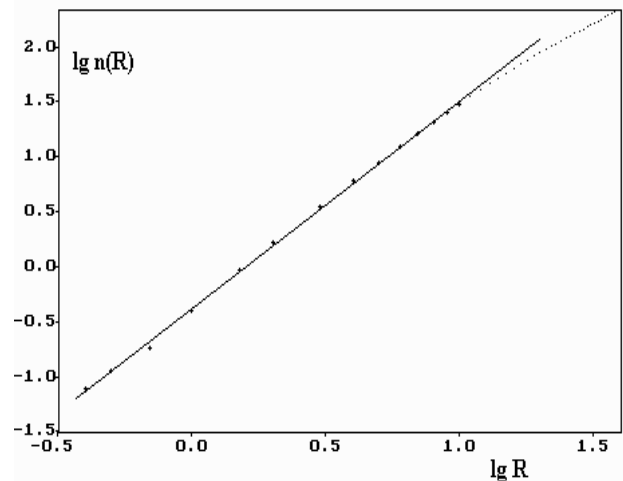
В таблице 1 приведена статистика минимальных сближений на небольшие расстояния. Здесь R – расстояние в км, $N(R)$ – количество сближений до расстояния R за весь расчетный интервал в 1080 суток, $n(R) = N(R)/1080$ – среднесуточное число сближений до расстояния R . В дальнейшем функция $n(R)$ будет основной функцией статистического анализа.

Как видно из этой таблицы, за одни сутки должно происходить примерно одно сближение до 1.5 км, и 120 сближений до 25 км, или одно «опасное» сближение каждые 12 мин. До расстояния 400 метров два объекта могут сблизиться в среднем один раз в 13 суток.

Таблица 1 – Число минимальных сближений до расстояния R км

R	N(R)	n(R)	R	N(R)	n(R)	R	N(R)	n(R)
0.4	84	0.078	7.0	17324	16.041	17.0	75320	69.741
0.5	124	0.115	8.0	21934	20.309	18.0	82030	75.954
0.7	198	0.183	9.0	27208	25.193	19.0	88665	82.097
1.0	432	0.400	10.0	32531	30.121	20.0	95356	88.293
1.5	1023	0.947	11.0	38270	35.435	21.0	102209	94.638
2.0	1801	1.668	12.0	44105	40.838	22.0	108921	100.853
3.0	3795	3.514	13.0	49986	46.283	23.0	115704	107.133
4.0	6443	5.966	14.0	56147	51.988	24.0	122538	113.461
5.0	9495	8.792	15.0	62365	57.745	25.0	129458	119.869
6.0	13184	12.207	16.0	68741	63.649	26.0	136232	126.141

Рисунок 1 – Зависимость
среднесуточного числа
сближений $n(R)$
и линейная аппроксимация
на расстояниях 0.4 км – 10 км



На рисунке 1 показана зависимость $\lg(n(R))$ от $\lg(R)$ в диапазоне расстояний 0.4 км – 40 км. Из рисунка видно, что на малых расстояниях (0.4 км – 10 км) эта зависимость хорошо представляется прямой линией:

$$\lg(n(R)) = a + b \cdot \lg(R), \text{ или } n(R) = c \cdot R^b, \quad (1)$$

где $c = 10^a$. Численные значения входящих сюда констант:

$$a = -0.3784 \pm 0.0099; b = 1.8799 \pm 0.0158; c = 0.4184 \pm 0.0096. \quad (2)$$

Из формулы (1) следует, что коэффициент c равен среднесуточному числу сближений до расстояния $R = 1$ км.

Заметим, что показатель степени $b = 1.8799$ можно рассматривать как фрактальную размерность множества точек минимального сближения, определяемых радиусом-вектором $\mathbf{R}=(R_x, R_y, R_z)$ в трехмерном фазовом пространстве (x,y,z) , а сам алгоритм определения этого параметра практически совпадает с методом Грассбергера–Прокаччия для вычисления корреляционной размерности фрактального множества [7, 8].

Для контроля этим же способом была обработана более ранняя версия того же каталога ГСС – на конец января 2011 года. Расчет проводился на 360 суток, при этом в логарифмическом масштабе линейная зависимость проявлялась до расстояния $R = 15$ км. Были получены следующие значения постоянных: $a = -0.6345 \pm 0.0058$; $b = 1.8241 \pm 0.0073$; $c = 0.2320 \pm 0.0031$. Значительные отличия параметров a, c от значений (2) легко объясняются разной полнотой двух каталогов, но обращает на себя внимание близость значений параметра b ($b = 1.8799$ по рабочему каталогу, и $b = 1.8241$ по каталогу годичной давности).

Если предположить, что степенная зависимость $n(R) = c \cdot R^b$ сохраняется и при $R < 0.4$ км, то можно проэкстраполировать значения $n(R)$ на предельно малые расстояния. Результаты такого прогноза приведены в таблице 2, где R – расстояние сближения в км; $n(R)$ – прогнозируемое сред-несуточное количество сближений до расстояния R ; $days = 1/n(R)$ – среднее количество суток на одно сближение; $years = days/365.25$ – среднее количество лет на одно сближение. Из этой таблицы следует, что, если наши предположения верны, то по состоянию геостационарной зоны на март 2012 года одно парное сближение каталогизированных ГСС до 3 м должно происходить в среднем за 362 года, до 5 м – за 138 лет, до 10 м – за 38 лет, до 30 м – за 4.8 года и т.д. Эти оценки следует считать оптимистическими, так как в используемый каталог ГСС не включены малоразмерные объекты. Согласно современным данным их количество исчисляется тысячами.

Таблица 2 – Расчет $n(R)$ по формуле (1) на малые расстояния

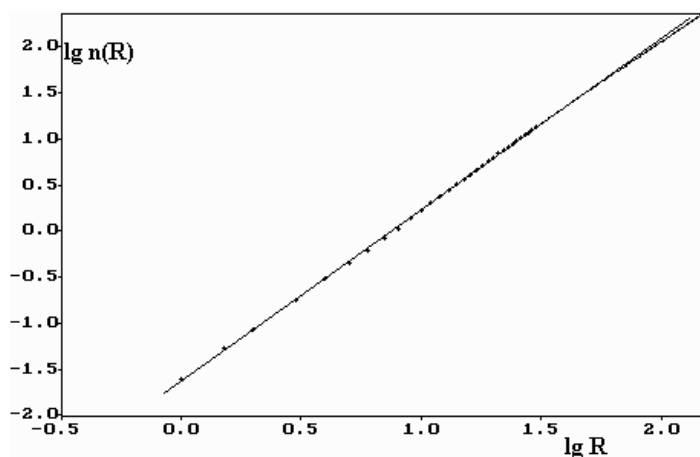
R	n(R)	Days	Years	R	n(R)	Days	Years
0.003	0.000008	132140	361.8	0.1	0.0055	181.2	0.4961
0.005	0.000020	50581	138.5	0.3	0.0435	23.0	0.0629
0.010	0.000073	13744	37.6	0.5	0.1137	8.80	0.0241
0.030	0.000574	1743	4.77	1.0	0.4184	2.39	0.0065

Выше мы полагали, что корректируемые ГСС двигаются по тем же законам, что и неуправляемые. Между тем ясно, что соответствующие службы контроля космического пространства не допустят слишком тесного сближения корректируемых ГСС. Поэтому представляет интерес про-вести аналогичный анализ только для неуправляемых спутников. В таблице 3 приведена статис-тика сближений только для пассивных ГСС. Обозначения такие же, что и в таблице 1.

Таблица 3. Число сближений до расстояния R (км) для пассивных ГСС

R	N(R)	n(R)	R	N(R)	n(R)	R	N(R)	n(R)
1.0	27	0.025	11.0	2192	2.030	22.0	8167	7.562
1.5	58	0.054	12.0	2618	2.424	23.0	8912	8.252
2.0	92	0.085	13.0	3030	2.806	24.0	9654	8.939
3.0	190	0.176	14.0	3505	3.245	25.0	10415	9.644
4.0	333	0.308	15.0	3959	3.666	26.0	11178	10.350
5.0	485	0.449	16.0	4481	4.149	27.0	11979	11.092
6.0	662	0.613	17.0	5041	4.668	28.0	12763	11.818
7.0	888	0.822	18.0	5625	5.208	29.0	13614	12.606
8.0	1159	1.073	19.0	6210	5.750	30.0	14451	13.381
9.0	1489	1.379	20.0	6834	6.328	31.0	15367	14.229
10.0	1838	1.702	21.0	7519	6.962	32.0	16251	15.047

Сравнивая данные из таблиц 1 и 3, можно заметить, что на небольших R основная часть сближений приходится на такие пары объектов, где хотя бы один является управляемым. Но и на больших расстояниях эта тенденция сохраняется. Общее количество сближений до 200 км для неуправляемых спутников за три года составило 415000, вместо 1.7 млн для всего массива ГСС. Заметим, что такая большая разница возникла только из-за того, что из исходного каталога было выброшено всего лишь 1/4 часть объектов.



Рисунке 2 – Зависимость среднесуточного числа сближений $n(R)$

для неуправляемых ГСС и линейная аппроксимация на расстояниях 1 км – 50 км

На рисунке 2 показана зависимость $\lg(n(R))$ от $\lg(R)$ для неуправляемых ГСС в интервале 1 км – 150 км. Из этого рисунка хорошо видно, что степенная зависимость вида (1) наблюдается на значительно большем диапазоне расстояний, чем для всего массива ГСС (см. рис.1), и составляет, как минимум, 1 км – 50 км. Численные значения постоянных, входящих в формулы (1), для пассивных ГСС получились такими:

$$a = -1.6313 \pm 0.0072; b = 1.8660 \pm 0.0064; c = 0.02337 \pm 0.00039. \quad (3)$$

Отличия констант a и c от значений, приведенных в (2), в особых комментариях не нуждаются. Однако показатель степени b оказался практически таким же, что и на полном массиве ГСС, несмотря на значительную разницу в исходных данных.

Таблица 4 – Расчет $n(R)$ на малые расстояния для неуправляемых ГСС

R	$n(R)$	days	years	R	$n(R)$	days	years
0.003	0.0000005	2182682	5976	0.1	0.000318	3143	8.600
0.005	0.0000012	841433	2304	0.3	0.002472	404.6	1.108
0.010	0.0000043	230832	632	0.5	0.006412	156.0	0.427
0.030	0.0000337	29716	81.4	1.0	0.023373	42.78	0.117

В таблице 4 представлен прогноз функции $n(R)$ на малые расстояния сближения только для пассивных ГСС. Расчет проводился по формулам (1) с учетом значений (3).

Таким образом, в рамках принятых предположений, тесные сближения двух неуправляемых спутников должны происходить довольно редко: до 30 метров – один раз за 81 год, до 100 метров – один раз за 8.6 года. Напомним, что при расчетах не учитывались малоразмерные объекты, не включенные в используемый каталог.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Среднесуточное количество сближений ГСС $n(R)$ до небольших расстояний R хорошо подчиняется степенному закону $n(R) = c \cdot R^b$.

2. Показатель степени b можно рассматривать как фрактальную размерность множества точек сближения, он слабо зависит от объема исходных данных и равен примерно 1.87.

3. Указанная зависимость с учетом сделанных в тексте предположений позволяет оценивать частоту опасных сближений на предельно малые расстояния.

ЛИТЕРАТУРА

1 <http://celestrak.com/satcat/boxscore.asp>

2 UNCOPUOS Scientific and Technical Subcommittee // Technical Report on Space Debris, A/AC.105/720, May 1999.

3 Schildknecht T., Musci R. et al. An Optical Search For Small-Size Debris In GEO And GTO. // Proceedings of the 5th US-Russian Space Surveillance Workshop. Pulkovo. St. Petersburg. September 24-27. 2003.

4 <http://celestrak.com/NORAD/elements.geo.txt>

5 <http://planet4589.org/space/log/geo.log>

6 Classification of geosynchronous objects. Issue 14. Prepared by T. Flohrer. February 2012, ESOC Robert-Bosch-Str. 5, D-64293 Darmstadt, Germany). <http://astronomer.ru/ru/menu-help-ru/help-info-ru/reference-ru.html> .

7 Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. – 1983. – Vol. 50, N 5. – P. 346-349.

8 Айманова Г.К., Демченко Б.И., Макаренко Н.Г. Прикладные методы топологической динамики. 2. Численный анализ хаоса // Препринт АФИФ. – 1990. – № 90-03. – Алма-Ата. – 52 с.

REFERENCES

1 <http://celestrak.com/satcat/boxscore.asp>

2 UNCOPUOS Scientific and Technical Subcommittee // Technical Report on Space Debris, A/AC.105/720, May 1999.

3 Schildknecht T., Musci R. et al. An Optical Search For Small-Size Debris In GEO And GTO. // Proceedings of the 5th US-Russian Space Surveillance Workshop. Pulkovo. St. Petersburg. September 24-27. 2003.

4 <http://celestrak.com/NORAD/elements.geo.txt>

5 <http://planet4589.org/space/log/geo.log>

6 Classification of geosynchronous objects. Issue 14. Prepared by T. Flohrer. February 2012, ESOC Robert-Bosch-Str. 5, D-64293 Darmstadt, Germany). <http://astronomer.ru/ru/menu-help-ru/help-info-ru/reference-ru.html> .

7 Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. – 1983. – Vol. 50, N 5. – P. 346-349.

8 Ajmanova G.K., Demchenko B.I., Makarenko N.G. Prikladnye metody topologicheskoy dinamiki. 2. Chislennyj analiz haosa // Preprint AFIF. – 1990. – № 90-03. – Alma-Ata. – 52 s.

Резюме

Б. И. Демченко, А. В. Диденко

(«Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЕЖШС, Алматы, Қазақстан Республикасы)

ГЕОСТАЦИОНАРЛЫҚ АЙМАҚҚА ҚАУІПТІ ЖАҚЫНДАСУДЫҢ КЕЙБІР СТАТИСТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

Геостационарлық серіктер (ГСС) орбитасы каталогының статистикалық талдауы негізінде R шамалы қашықтығында ГСС $n(R)$ -дің ортатәуелділік жақындасу саны $n(R)=c \cdot R^b$ салмақты функциямен жақсы түсіндіріледі, мұнда c , b – тұрақтылық. Осы тәуелділікті қолдана отырып ГСС-тің қауіпті жақындасу жиілігіне баға беріледі.

Тірек сөздер: статистикалық талдау, жерге жақын ғарыштық кеңістік, жақындау.

Summary

B. I. Demchenko, A. V. Didenko

(D TOO «Fesenkov Astrophysical Institute», Almaty, Republic of Kazakhstan)

SOME STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE DANGEROUS RAPPROCHEMENTS IN GEOSTATIONARY ZONE

On the basis of the statistical analysis of the catalogue of orbits of geostationary satellites (GSS) it is established, that the average daily number of the GSS' rapprochements $n(R)$ at small distances R is well described by power-mode function $n(R) = c \cdot R^b$, where c, b – constants. Using this dependence we made the estimation of the GSS' frequency of dangerous rapprochements.

Keywords: statistical analysis, circumterrestrial space, rapprochement.

Поступила 2.09.2013г.