

УДК 004.9:629.786

DOI 10.34822/1999-7604-2021-1-31-40

РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ СЕАНСОВ СВЯЗИ МЕЖДУ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ И ЗЕМНЫМИ СТАНЦИЯМИ

В. С. Старшинов ✉, С. Г. Цапко

Томский политехнический университет, Томск, Россия

✉ E-mail: vss21@tpu.ru

В статье проведен анализ распределения сеансов связи между космическими аппаратами и земными станциями в виде диаграмм активностей; реализован алгоритм, основанный на анализе бизнес-процессов управления космическими аппаратами; сформированы критерии оптимального сеанса связи. Программная реализация алгоритмов выполнена в среде Mathcad, позволяющей провести их апробацию с ограниченным количеством земных станций и космических аппаратов, создана имитационная модель распределения сеансов связи в среде AnyLogic. Полученные результаты программы для автоматизированного планирования расписания сеансов связи и имитационной модели распределения сеансов связи показали работоспособность алгоритма.

Ключевые слова: космические аппараты, земные станции, сеансы связи, имитационная модель, автоматизированное планирование.

IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF ALGORITHM FOR AUTOMATED OPERATIONAL PLANNING OF COMMUNICATION SESSIONS BETWEEN SPACECRAFT AND EARTH STATIONS

V. S. Starshinov ✉, S. G. Tsapko

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

✉ E-mail: vss21@tpu.ru

The paper considers the process of distribution of communication sessions between spacecraft and earth stations in the form of activity diagrams. To implement the algorithm, an analysis of the business processes of the distribution of communication sessions when controlling spacecraft between earth stations is made. The criteria for an optimal communication session are formed. The software implementation of the algorithms is performed in the Mathcad environment, which allows testing the obtained algorithms with a limited number of earth stations and spacecraft. For an adequate assessment of the obtained algorithm, additional validation is carried out in the AnyLogic simulation environment. The program results for the automated planning of communication sessions and the simulation model of the distribution of the session demonstrated the efficiency of the developed algorithm.

Keywords: spacecraft, earth stations, communication sessions, simulation model, automated planning.

Введение

При управлении космическими аппаратами (КА) с наземных комплексов управления (НКУ) через земные станции обслуживания (ЗСО) постоянно возникает проблема оперативного распределения сеансов связи (СС) между КА орбитальной группировки (ОГ) и ЗСО из-за различных требований к аппаратному и программному обеспечению КА, а также характеристик ЗСО [1].

Для непрерывного функционирования орбитальной группировки КА требуется постоянное обслуживание оператора. В связи с тем, что КА в составе ОГ имеют специфические

отличия, а также могут находиться вне зоны обслуживания оператором, необходимо обеспечить программный уровень контроля и обслуживания. Управление оператором КА в режиме реального времени затруднено из-за технических ограничений ЗСО, различных зон радиовидимости и траекторий полета КА, поэтому процесс распределения СС между КА и ЗСО должен быть автоматизирован с учетом всех ограничений, которые могут повлиять на непрерывное функционирование.

Для автоматизации процесса оперативного распределения СС между КА и ЗСО необходимо реализовать автоматизированную систему, формирующую расписание СС на основе разработанного алгоритма планирования, позволяющего избавить оператора от рутинных задач и возможных ошибок расчета [1–2].

Концептуальная модель

Для реализации инструментов автоматизированного распределения СС необходимо проанализировать процесс формирования СС при управлении КА с ЗСО. При моделировании процесса распределения ресурсов и временных промежутков для СС возникает потребность в алгоритмической детализации и логической разработке операций. Диаграммы деятельности в UML (Unified Modeling Language) позволяют моделировать динамические аспекты поведения системы и отображать последовательные или параллельные шаги вычислительного процесса. Концептуальную модель процесса распределения СС можно условно разделить и представить в виде 2 диаграмм активности (процессов): генерации массива заявок (рис. 1) и приема массива заявок (рис. 2).

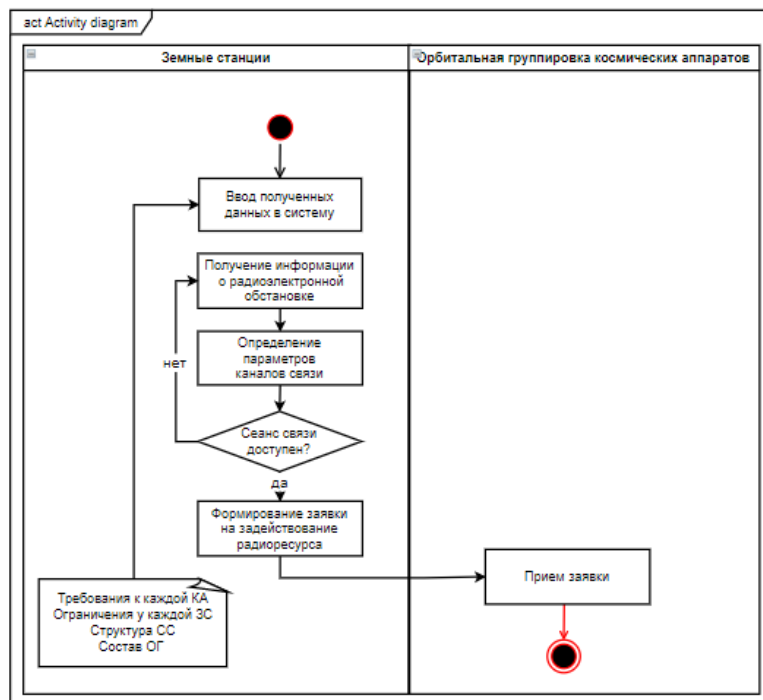


Рис. 1. Диаграмма активности при генерации массива заявок

Примечание: составлено по [3, с. 42].

Диаграмма, представленная на рис. 1, показывает шаги по созданию массива заявок с полной информацией об ограничениях и требованиях, влияющих на непрерывное обеспечение СС (получение первоначальных данных о составе ОГ, технических ограничениях ЗСО, характеристиках и особенностях обслуживания разных поколений КА и пр. параметров). После получения полного пула ограничений и требований необходимо сформировать информацию о радиоэлектронной обстановке в виде набора факторов, влияющих на качество

передаваемого радиосигнала между ЗСО и КА, и на их основе определить параметры каналов связи, которые учитываются при формировании данных о возможных зонах радиовидимости (ЗРВ), скорости передачи и пр. При получении возможности создания СС в ЗСО формируется заявка на задействование радиоресурса КА либо происходит поиск информации о радиоэлектронной обстановке для выбора другого КА. В случае успешного формирования заявка отправляется в ОГ для отбора на основе характеристик приоритетности [3].

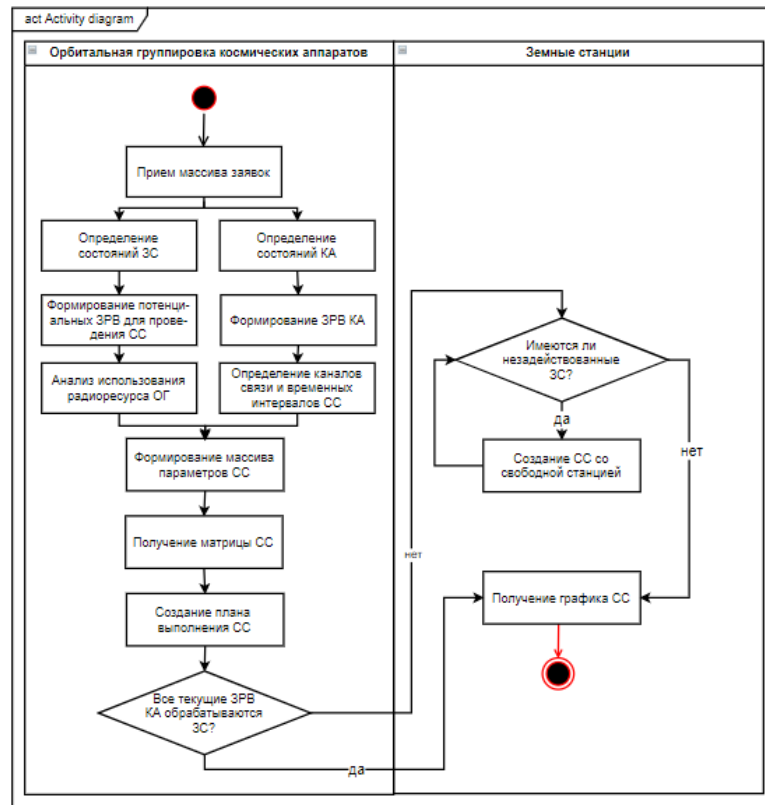


Рис. 2. Диаграмма активности при приеме заявок на задействование ресурсов
Примечание: составлено по [3, с. 43].

Диаграмма активности при приеме массива заявок (рис. 2) отображает процесс получения графика СС (расписание планирования СС) на основе принимаемых заявок с учетом ограничений, характеристик и фильтрации по приоритетности. Для организации СС необходимо, чтобы КА был готов к задействованию радиоресурса с ЗСО, поэтому определяется готовность обеих сторон. После определения возможности принять СС между ЗСО и КА формируется массив потенциальных ЗРВ для прогнозирования задействования радиоресурсов. Сформированные ранее ЗРВ КА и ЗСО при наложении выдают массив каналов связи. Данные результаты позволяют составить план выполнения СС, который перебирает массив каналов связи для составления массива СС [4].

Алгоритм оперативного планирования расписания СС между КА и ЗСО

Для формирования оптимальных СС следует учесть следующие критерии:

- минимальное (вплоть до отсутствия) количество переключений между ЗСО во время обслуживания КА (переключение необходимо при высокой загрузке всех ЗСО, когда одному из КА не хватает времени на обслуживание);
- максимальная загрузка ЗСО (время простоев стремится к минимуму) из-за необходимости отключения ЗСО на сутки с распределением СС между другими ЗС;
- начало обслуживания КА при появлении в ЗРВ свободной ЗСО;
- обслуживание КА по приоритету, задаваемому оператором.

Разрабатываемый алгоритм планирования СС должен принимать на вход все заданные требования и ограничения и преобразовывать их в итоговый план-график СС. Алгоритм можно разделить на следующие важные составляющие:

1. Сбор требований и ограничений: состав, структура и параметры ОГ КА, количество рабочих ЗСО и их местоположение.

Для каждой ЗСО необходимо собрать следующие характеристики:

- техническое оснащение, средства управления и ЗРВ;
- географические координаты ЗС;
- типы ЗСО.

Для каждого КА учитываются следующие характеристики:

- параметры технологического цикла;
- тип бортовой аппаратуры;
- номер суточного витка;
- пространственно-временное положение каждого витка.

2. Формирование массива входной информации – получение заявки с характеристиками для расчета ЗРВ, содержащей следующую информацию:

- условный номер КА (идентификатор);
- условный номер расположения ЗСО (идентификатор);
- номер витка орбиты в момент входа КА в ЗРВ;
- номер витка орбиты в момент выхода КА из ЗРВ;
- номер технического средства;
- тип бортовой аппаратуры;
- дата и время начала радиовидимости;
- дата и время окончания радиовидимости;
- пространственное положение каждого КА;
- время, требуемое для проведения СС.

3. Формирование матрицы ЗРВ при взаимодействии КА и ЗСО с использованием данных заявки: номера КА, даты и времени начала ЗРВ, даты и времени окончания ЗРВ. Матрица ЗРВ будет, по сути, определять вхождение в промежуток времени интервалов радиовидимости, поэтому для начала нужно поделить суточное время на определенные промежутки (например, 2 часа). После деления суточного времени на отрезки рассчитывают временные коэффициенты начала и конца ЗРВ, для чего нужно поделить начало временного промежутка на 24. Результат полученного соотношения времени и коэффициентов временного промежутка представлен в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение времени и коэффициентов временного промежутка

Время (в часах)	Коэффициент временного промежутка
0	0
2	0,083333
4	0,166667
6	0,25
8	0,333333
10	0,416667
12	0,5
14	0,583333
16	0,666667
18	0,75
20	0,833333
22	0,916667
24	1

Примечание: авторская разработка.

После формирования ЗРВ КА создается матрица ЗРВ, для чего производится перебор всех строк массива (КА) и проверка вхождения ЗРВ в каждый промежуток времени (рис. 3). Если нача-

ло ЗРВ меньше или равно предыдущему временному коэффициенту и конец радиовидимости больше или равен текущему временному коэффициенту, то в текущее поле на пересечении столбца с временным коэффициентом и строкой с номером КА ставится значение «1», которое будет являться флагом занятости ЗРВ в данном промежутке времени, в противном случае – «0» [5–7].

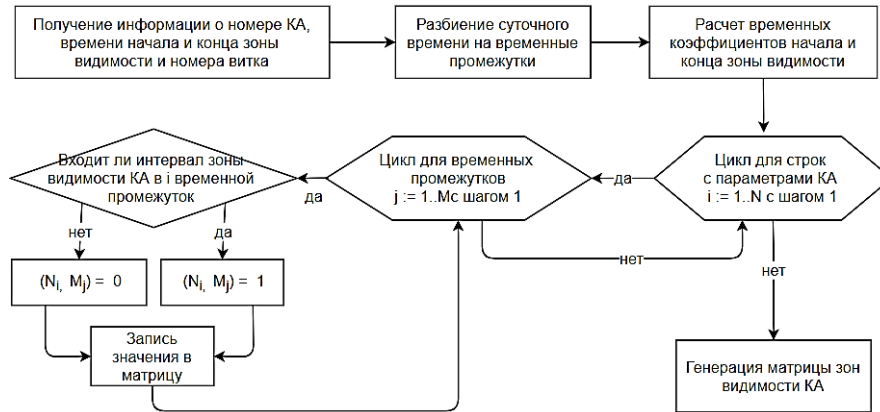


Рис. 3. Формирование матрицы ЗРВ при взаимодействии КА и ЗСО

Примечание: составлено авторами.

4. Формирование плана выполнения СС. Полученные матрицы ЗРВ вносят в исходные данные программы, затем происходит перебор длительности СС, после выбора длительности СС производится перебор столбцов матрицы ЗРВ. В дальнейшем происходит перебор по строкам ЗРВ без учета количества последних строк, равных длительности СС. Если у ЗСО имеется свободное время для обслуживания КА (перебор по «1» в строке матрицы), то данные перезаписываются в результирующую матрицу, куда копируются значения «1» в используемых ЗРВ. Если в данных строках свободного времени нет, его ищут в последних матрицах, не использовавших это время в предыдущих матрицах. Если в начале СС имеется значение «0», то дальнейшая проверка на «1» не имеет смысла, а в случае нахождения «1» в начале СС результат записывается в результирующую таблицу. Если в результирующей таблице данный временной промежуток занят КА (более приоритетным), происходит поиск свободных ячеек в другой ЗСО. После перебора всех КА и ЗСО составляется результирующая матрица обслуживания [6–7] (рис. 4).

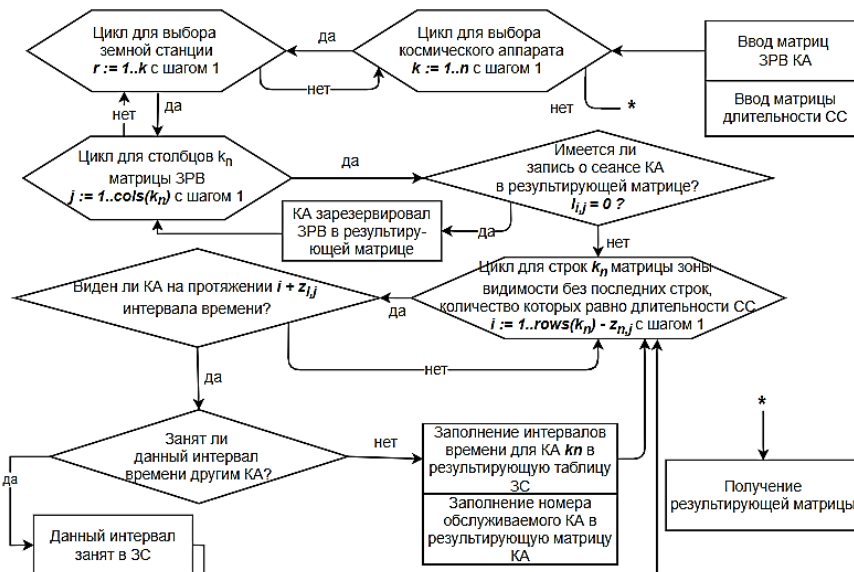


Рис. 4. Блок-схема алгоритма для этапа формирования плана выполнения СС между КА и ЗСО в процессе распределения СС

Примечание: составлено авторами.

Для программной реализации алгоритма была выбрана математическая среда Mathcad.

Исходные данные формируются из заявки, которая содержит информацию для расчета ЗРВ.

В первом массиве каждая из матриц указывает на ЗРВ для каждой ЗСО, где столбцы – номера КА, а строки – значения временных интервалов. Для более точного распределения СС сутки были разбиты на 15-минутные отрезки времени (в совокупности 96 шт.). Если значение ячейки в матрице равно «0», то КА (столбец) не входит в ЗРВ ЗСО (номер матрицы) на данном интервале времени (строка), если значение равно «1», то КА находится в ЗРВ данной ЗСО и можно планировать СС (рис. 5).

[illegible]

Рис. 5. Матрицы ЗРВ для каждой ЗС

Примечание: составлено авторами.

Во втором массиве имеется вектор-строка, в которой указана длительность в 15-минутных интервалах (время, необходимое для проведения обслуживания КА), где номер КА – номер столбца вектора (рис. 6).

$$z := (12 \ 15 \ 13 \ 14 \ 13 \ 14 \ 17 \ 9 \ 12 \ 14 \ 12 \ 15 \ 13 \ 13 \ 15 \ 16 \ 11 \ 12 \ 13 \ 10 \ 14 \ 12 \ 11 \ 8)$$

Рис. 6. Вектор длительности времени СС, необходимого для проведения обслуживания КА

Примечание: составлено авторами.

В результате работы алгоритма формируется матрица расписания для КА – l , вектор обслуженных КА – s , матрица расписания для ЗС – X и число S – количество обслуженных КА (рис. 7).

```
return (1 s X S)
```

$$d(1, s) = (\{96, 24\} \quad \{1, 24\} \quad \{96, 4\} \quad 24)$$

Рис. 7. Результаты работы алгоритма

Примечание: составлено авторами.

Матрица расписания КА (I) имеет размерность 96×24 , т. к. в каждом часе 4 интервала по 15 минут, в сутках 24 часа, соответственно, интервалов разбиения в сутках $24 \times 4 = 96$, количество КА – 24. Если СС успешно зарезервирован для КА, то в зарезервированных ин-

тервалах ставится номер ЗСО. В интервалах времени, когда КА не обслуживается, стоит «0», если КА не обслужен, то весь столбец равен «0» (рис. 8) [3, 8].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
18	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
19	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
20	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
21	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
22	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	3	0
23	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0
24	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0
25	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0
26	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0
27	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0
28	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0
29	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0

Рис. 8. Матрица расписания КА

Примечание: составлено авторами.

Вектор обслуженных КА (s) имеет размерность 1×24 и содержит информацию об обслуживании КА. Если СС для КА успешно зарезервирован, то ячейка принимает значение «1», если КА не обслужен за сутки, то значение равно «0». Можно заметить, что все КА обслужены успешно (рис. 9).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 9. Вектор обслуженных КА

Примечание: составлено авторами.

Матрица расписания ЗСО (X) имеет размерность 96×4 , т. к. интервалов разбиения в сутках $24 \times 4 = 96$, а количество ЗСО – 4. Ячейки принимают значения номеров тех КА, которые обслуживаются данной ЗСО (номер ЗСО соответствует столбцу), если ЗСО свободна в каком-то интервале времени, то ячейка в строке этого интервала принимает значение «0» (рис. 10).

	1	2	3	4
1	2	12	24	0
2	2	12	24	0
3	2	12	24	0
4	2	12	24	0
5	2	12	24	0
6	2	12	24	0
7	2	12	24	0
8	2	12	24	0
9	2	12	24	0
10	2	12	22	0
11	2	12	22	0
12	2	12	22	0
13	2	12	22	0
14	2	12	22	0
15	2	12	22	0
16	2	12	22	0
17	3	11	22	0
18	3	11	22	0
19	3	11	22	0
20	3	11	22	0
21	3	9	22	0
22	3	5	22	19
23	3	5	16	19
24	3	5	16	19
25	3	5	16	19
26	3	5	16	19
27	3	5	16	19
28	3	5	16	19

Рис. 10. Матрица расписания ЗС

Примечание: составлено авторами.

Число S – количество обслуженных КА. Сумма всех включенных в расписание КА, которые нужно обслужить, должна быть равна их количеству – 24.

$$d(1, s)_{1,4} = 24 \quad (1)$$

На основе (1) можно сделать вывод, что все КА успешно включены в расписание [8].

Апробация алгоритма

Для апробации алгоритма была использована среда для имитационного моделирования AnyLogic. Для верификации полученного алгоритма и данных, сформированных программной реализацией алгоритма, была разработана имитационная модель, с помощью которой можно проверить занятость КА и ЗСО. Блок-схема алгоритма работы модели представлена на рис. 11.

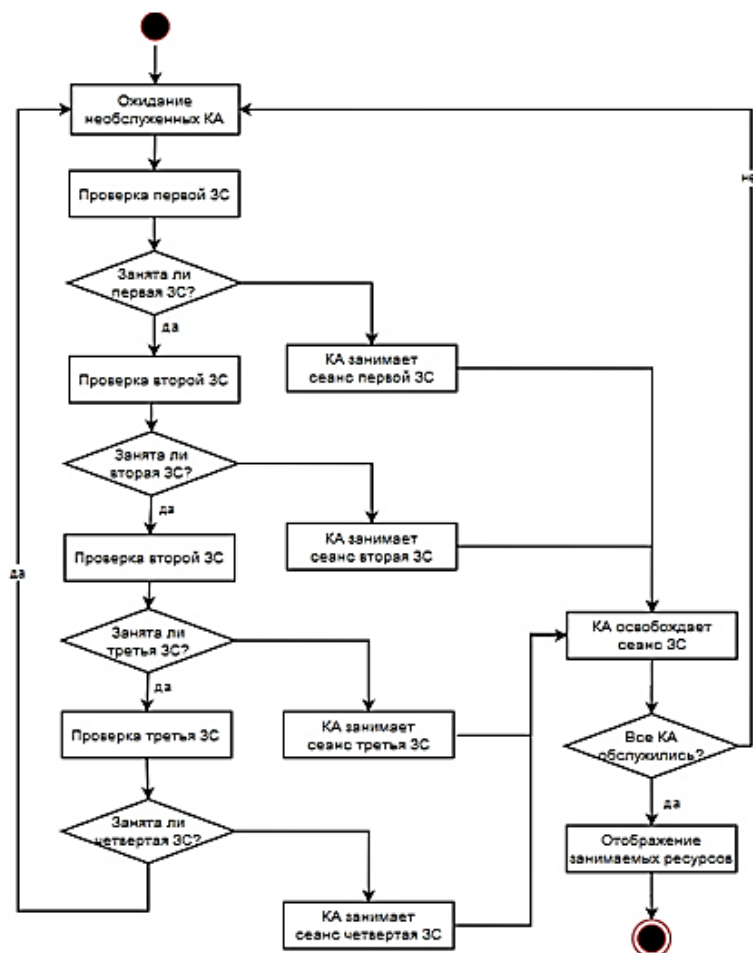


Рис. 11. Полученные значения работы алгоритма

Примечание: составлено авторами.

Вначале генерируются заявки на обслуживание от КА и формируется их очередь. После помещения заявок в очередь производится проверка работоспособности всех ЗСО по порядку – при занятости очередной ЗСО проверяется следующая. В случае отсутствия свободных ЗСО КА возвращается в очередь. Если ЗСО не занята либо уже освобождена очередным КА, то следующий КА занимает ЗСО и освобождает ее по завершении ЗРВ [7–8].

Для проверки работы модели, исходя из предложенного алгоритма, на вход поступают 24 КА и распределяются по ЗСО согласно алгоритму обслуживания, описанному выше. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 12.

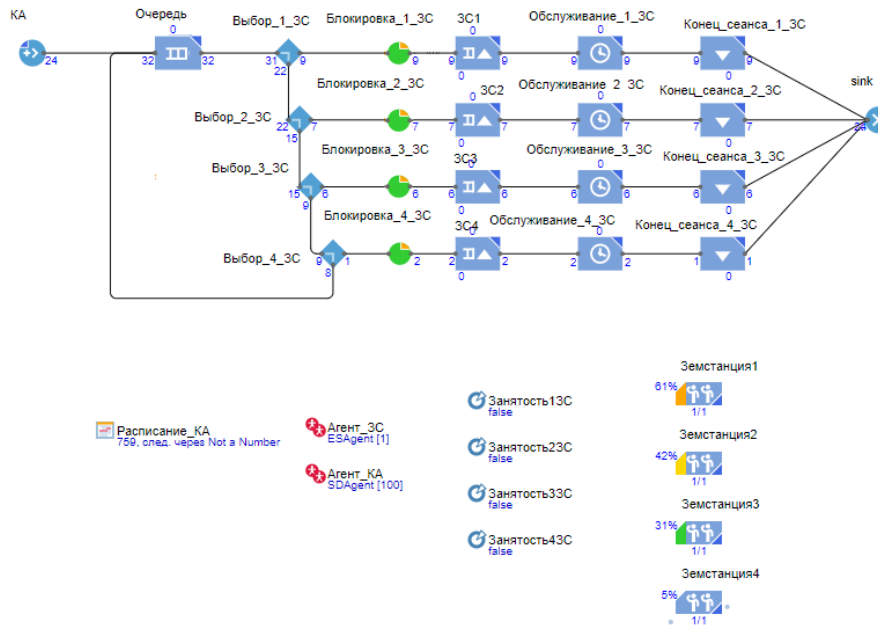


Рис. 12. Полученные значения работы алгоритма

Примечание: составлено авторами.

Как можно заметить, КА распределены по ЗСО и все смогли зарезервировать СС, что показывает высокую эффективность алгоритма (24 заявки в блоке КА были переданы в блок «Обслужены») (табл. 2).

Таблица 2

Количество обслуженных КА у каждой ЗС

№ ЗС	Кол-во обслуженных КА
1	9
2	7
3	6
4	1

Примечание: авторская разработка.

В алгоритме также были обслужены все КА ($S = 24$) с таким же распределением по ЗСО.

Судя по полученным результатам, через очередь прошли 32 заявки, поскольку 8 раз КА из-за занятости всех ЗСО были возвращены в очередь. Алгоритм обеспечил обслуживание всех КА назначенной ЗСО без переключения, что говорит о его соответствии необходимым критериям. В параметре расписания «Расписание_КА» можно заметить, что последним обслуженным КА был номер 759 [6, 8].

Закключение

В работе исследована проблема распределения сеансов связи между космическим аппаратом и земной станцией обслуживания. В ходе изучения проблемы были сформированы критерии и концептуальная модель, состоящая из диаграмм активностей процесса распределения сеансов связи между земными станциями, для управления космическими аппаратами.

Программная реализация алгоритма произведена в среде Mathcad. Получены матрицы расписаний для 4 земных станций обслуживания и 24 космических аппаратов с интервалами радиовидимости в 15 минут. Результаты показали, что все космические аппараты были обслужены земными станциями с учетом сформированных ранее критериев.

На основе программной реализации произведена апробация в среде имитационного моделирования AnyLogic. Результаты моделирования показали аналогичные программе ре-

зультаты: 8 космических аппаратов были возвращены в очередь из-за занятости земных станций, поэтому через очередь прошли 32 заявки вместо 24, что соответствует заявленным критериям обслуживания космических аппаратов без переключения между ними и максимальной загруженности земных станций обслуживания.

Литература

1. Скобелев П. О., Травин В. С., Жиляев А. А., Симонова Е. В., Иванов А. Б. Мультиагентная технология адаптивного планирования сеансов связи группировки малых космических аппаратов с наземными станциями // Информационные технологии в управлении : сб. тр. 7-й Рос. мультikonф. по проблемам управления (ИТУ-2014). СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 701–709.
2. Колпин М. А., Проценко П. А. Методика планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Научные технологии в космических исследованиях земли. М. : Медиа паблишер, 2018. С. 2.
3. Ковальский А. А. Методика и алгоритм оперативного планирования сеансов спутниковой связи на основе технологии гибких стратегий управления // Тр. учеб. заведений связи. 2018. Т. 4, № 4. С. 36–46. DOI 10.31854/1813-324X-2018-4-4-36-46.
4. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М. : МГТУ им. Баумана, 2003. 336 с.
5. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. 2002. № 6. С. 45–61.
6. Соловьёв В. А. Полеты в космос. Оперативное управление космическими аппаратами. URL: <http://mfk.msu.ru/attachment/114/lecture1.pdf> (дата обращения: 16.09.2020).
7. Калашников Д. А., Соловьёв В. А., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Майоров И. В., Лахин О. И., Тихонов Д. И., Ворожейкин В. Н. Метод адаптивного планирования сеансов связи ЦУП с группировкой КА по критериям надежности и экономичности связи // Вестн. Самар. гос. технич. ун-та. Сер. Технич. науки. 2015. № 1. С. 58–70.
8. Старшинов В. С., Подкаминер Е. Д., Цапко С. Г. Имитационное моделирование процесса распределения сеансов управления космическими аппаратами между земными станциями // Наука. Технологии. Инновации : сб. материалов XIV Всерос. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск, 2020. С. 78–83.