Модель планирования информационного обмена в условиях структурной динамики сети космической связи

Information exchange planning model in context of structural dynamics of the space communication network

Москвин / Moskvin B.
Борис Владимирович
(z-moskvin@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» (ВКА им. А. Ф.Можайского) МО РФ,
доцент кафедры.
г. Санкт-Петербург

Колесников / Kolesnikov K.
Константин Григорьевич
(kongrikol@rambler.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф.Можайского,
доцент кафедры.
г. Санкт-Петербург

Масалкин / Masalkin A.
Александр Алексеевич
(of.mas632@yandex.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф.Можайского,
старший научный сотрудник лаборатории военного института (научно-исследовательского).
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: целевое функционирование – target operation; динамически изменяющаяся структура сети связи – dynamically changing communication network structure; статическая модель – static model; декомпозиция – decomposition; математическое программирование – math programming.

Рассматриваются вопросы планирования передачи информации в сети космической связи с динамически изменяющейся структурой. Изменение структуры сети связано с перемещением космических аппаратов связи. На основе анализа и прогноза движения космических аппаратов выделяются интервалы постоянства структуры сети передачи информации. Использование декомпозиционных алгоритмов планирования приводит к возможности независимого планирования передачи информации на интервалах постоянства структуры и координации этих решений на основе учета технических ресурсов космических аппаратов, используемых на всем интервале управления.

The issues of planning the transmission of information in a space communication network with a dynamically changing structure are considered. A change in the network structure is associated with the movement of communication spacecraft. Intervals of structure constancy of the information transmission network are distinguished based on the analysis and prediction of the motion of spacecraft. The use of decomposition planning algorithms leads to the possibility of independent planning of information transmission at intervals of structure constancy and coordination of these decisions based on the accounting of the technical resources of spacecraft used over the entire control interval.

Введение

Развитие систем автоматизированного управления космическими аппаратами, функционирование которых связано с обработкой больших объемов данных, приводит к необходимости использования в контуре таких систем подвижных элементов (объектов), осуществляющих информационный обмен между различными подсистемами. Класс таких систем весьма широк. К ним относятся, в частности, системы сбора и передачи через подвижные ретрансляторы информации в центральный пункт, где эта информация обрабатывается; системы, состоящие из совокупности КА, выполняющих общую целевую задачу и осуществляющих между собой информационный обмен с целью координации действий.

Вместе с тем математические модели, которые позволили бы автоматизировать процесс распределения информации между элементами системы с учетом изменяющейся во времени ее структуры, в настоящее время разработаны достаточно слабо. В частности, в работах [1, 2] рассматривается информационное взаимодействие с одиночным КА на интервале времени, на котором сохраняется интервал постоянства структуры космической сети связи. В работах [3–5] предложен подход к решению задачи организации информационного взаимодействия кластера малых КА, основанный

на использовании методов линейного программирования. Однако данный подход подразумевает поиск решения на всем интервале планирования без проведения декомпозиции исходной задачи по интервалам постоянства, что приводит к необоснованному увеличению размерности задачи и затрудняет его применение на практике.

В этой связи разработка моделей, позволяющих получать согласованные планы информационного взаимодействия на отдельных интервалах постоянства структуры, согласованные по целям и ресурсам системы, является весьма актуальной задачей, решение которой позволит принимать обоснованные решения по управлению информационными потоками, сократить потери информации, более полно использовать ресурсы КА.

В задаче планирования информационного обмена в сети связи с динамически изменяющейся структурой наряду с ограничениями пропускных способностей каналов передачи данных необходимо учитывать динамику относительного перемещения КА. Такой учет производится с использованием понятий динамической сети [6–8], структура и пропускные способности дуг которой меняется во времени. Вместе с тем на основе анализа и прогноза изменения структуры сети выделяются интервалы постоянства структуры передачи информации. В этих условиях создается возможность перехода от динамической модели, описывающей условия передачи информации, к ее статической интерпретации [9].

Математическая модель передачи информации

Основой сведения задачи в динамической интерпретации к статической интерпретации служит учет специфики функционирования системы, заключающейся в том, что перемещение КА приводит к дискретному изменению структуры сети, т.е. потенциальных возможностей передачи информации в ней, а все характеристики сети представляют кусочно-постоянные функции. Такое изменение происходит в моменты времени, когда КА входят (или выходят) из зон взаимной радиовидимости друг друга и наземных пунктов связи (НП) (рис. 1).

На рис. 1 представлена структура системы космической сети связи на последовательных временных интервалах постоянства структуры. Дугами представлены возможные варианты передачи информации между элементами космической сети связи (КА и НП) от первого абонента ко второму. Упорядоченное множество моментов времени, когда изменяется структура сети или ее характеристики, $\{t_0, t_1, t_2, ..., t_k\}$ разбивает весь интервал T на подынтервалы, соответствующие постоянной структуре сети. Под интервалом постоянства структуры сети космической связи понимаются интервалы времени, на которых возможности передачи информации, а следовательно и структура системы, остаются неизменными. Произвольному интервалу $(t_{l-1}, t_l]$ постоянства структуры сети и всех её числовых характеристик сопоставим номер $l \in L = \{0,1,2,...,k\}$, L – множество номеров интервалов постоянства структуры; k – число интервалов постоянства структуры сети связи. Здесь $l = 0$ соответствует интервалу времени, предшествующему первому интервалу постоянства структуры.

Решение можно обобщенно представить структурой, состоящих из четырех векторов X, Y, W, Z, где:

X – характеризует время передачи информации между узлами;

Y – характеризует накопление информации в буфере КА;

W – характеризует объем информации, переработанной в узлах;

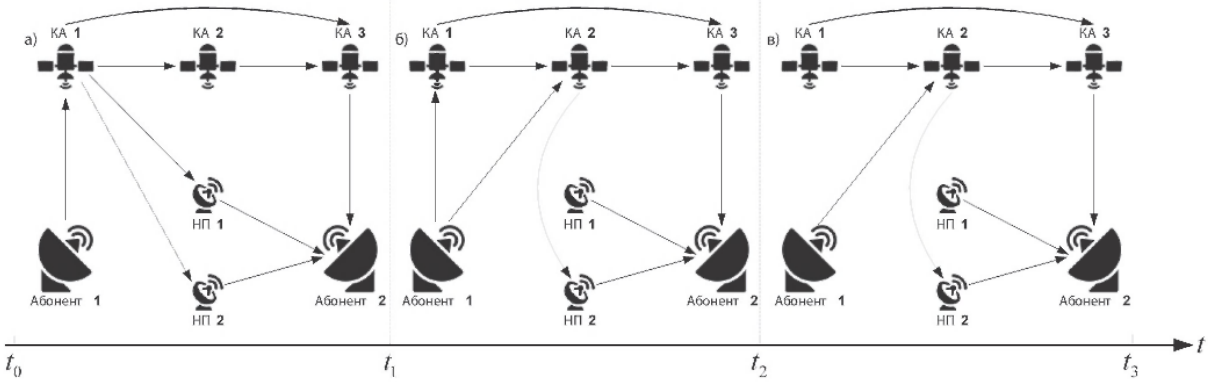

Рис. 1. Пример динамики структуры сети космической связи двух абонентов: а) первый временной интервал $T_1 = (t_0, t_1]$; б) второй временной интервал $T_2 = (t_1, t_2]$ в) третий временной интервал $T_3 = (t_2, t_3]$.

Z – характеризует потери информации в узлах.

Структура сети космической связи на каждом интервале постоянства структуры характеризуется множеством дуг $g_l, l \in L$. Тогда вектор X будет иметь $g = \sum_{l \in L} g_l$ компонент, равное суммарному количеству дуг графов, характеризующих структуру системы на всех интервалах постоянства. При этом каждая дуга соответствует возможности (наличию канала связи) передачи информации. Вектора $Y, W, Z,$ имеют число компонентов, равное (nk), где $n = |N|$, N – множество узлов связи. Тогда условия передачи информации описываются системой из (nk) линейных уравнений и $(g + 3nk)$ переменных, причем на часть из них наложены дополнительные ограничения. Построенная математическая модель задает множество допустимых решений Δ по распределению информационных потоков между подвижными объектами.

В этом случае статическую модель, описывающую условия передачи информации в сети связи с динамически изменяющейся структурой, можно представить в виде

$$\sum_{i \in Q_{jl}^{(+)}} \psi_{ij}^l x_{ij}^l + y_j^{l-1} + \varphi_j^l = \sum_{r \in Q_{jl}^{(-)}} \psi_{jr}^l x_{jr}^l + y_j^l + z_j^l + w_j^l, j \in N, l \in \{1, \ldots, k\}, \quad (1)$$ [1]

$$\sum_{(i,j) \in W_k^l} x_{ij}^l \le T_l, W_k^l \in W_0^l, l \in L, \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{i \in Q_j^{(-)}} p_j^l x_{ji}^l < P_{0j}, j \in N, \quad (3)$$

$$x_{ij}^l > 0, 0 < y_{jl} < V_j, 0 < w_{jl} < \omega_j^l, j \in N, l \in L. \quad (4)$$

где ψ_{ij}^l – интенсивность (скорость) передачи информации между i-м и j-м узлами на l-м интервале постоянства структуры;

x_{ij}^l – время передачи информации между i-м и j-м узлами на l-м интервале постоянства структуры;

y_j^l – количество информации, поступившей в буферный накопитель j-го узла на l-м интервале;

φ_j^l – количество информации, поступившей в j-й узел на l-м интервале постоянства структуры от внешних поставщиков информации;

z_j^l – количество информации, потерянной в j-м узле на l-м интервале;

w_j^l – количество информации, обработанной в j-м узле на l-м интервале;

$Q_{jl}^{(+)}$ – множество узлов, из которых в j-и узел может поступить информация на l-м интервале (полустепень входа вершины графа);

$Q_{jl}^{(-)}$ – множество узлов, в которые может передаваться информация из j-го узла на l-м интервале (полустепень выхода вершины графа);

T_l – длительность интервала постоянства структуры на l-м интервале;

W_0^l – множество путей передачи информации на l-м интервале;

W_k^l – множество каналов передачи информации на k-м пути l-го интервала;

p_j^l – интенсивность расходования энергоресурсов j-м объектом на передачу информации на l-м интервале постоянства структуры;

V_j – запас энергоресурсов j-го объекта;

ω_j^l – объем буферного накопителя j-го узла;

Ограничения (1) описывают условия поступления (передачи) информации в j-й узел на l-м интервале постоянства структуры динамической сети. В левой части описывается поступление информации. Она может поступать из других узлов сети, от внешних источников информации φ_j^l и из буферного накопителя с предыдущего интервала y_j^{l-1}. Правая часть равенства описывает условия передачи информации в другие узлы сети, переработку информации в узле w_{jl}, накопление информации в буферном накопителе для ее последующей передачи на других интервалах постоянства структуры y_j^l и потери информации z_j^l (рис. 2).

На рис. 2 представлено прохождение информации через j-й узел космической сети связи на l-м интервале постоянства структуры. Количество поступившей в узел информации I_1 определяется интенсивностью (скоростью) передачи информации между узлами – $\{\psi_{i_1 j}, \psi_{i_2 j}, \ldots\}, i \in Q_{jl}^{(+)}$ и временем работы каналов связи – $\{x_{i_1 j}, x_{i_2 j}, \ldots\}, i \in Q_{jl}^{(+)}$, а также состоянием буферного накопителя на предыдущем интервале постоянства – y_j^{l-1} и количеством информации, поступившей от внешних поставщиков информации – φ_j^l, $I_1 = \sum_{i \in Q_{jl}^{(+)}} \psi_{ij}^l x_{ij}^l + y_j^{l-1} + \varphi_j^l$. Аналогичным образом определяется количество покинувшей узел информации – $I_2 = \sum_{i \in Q_{jl}^{(-)}} \psi_{jr_1}^l x_{jr_2}^l + y_j^l + w_j^l + z_j^l$. Количество принятой информации должно равняться количеству переданной информации: $I_1 = I_2$.

Ограничения (2) описывают требование работы каналов связи во временных пределах интервала постоянства структуры (T_l). Ограничения (3) описывают интегральное расходование ресурсов узла на всех интервалах постоянства структуры.

Ограничения (1–4) описывают в целом допустимые варианты передачи информации в сети связи с динамически изменяющейся структурой. Число таких вари-

[1] Считается, что на момент времени t_0 буферные накопители всех КА связи пусты, а, следовательно, $y_j^0 = 0$

антов достаточно велико, и целесообразно выбирать вариант, наилучший в некотором смысле, наиболее полно отвечающий особенностям управления КА и сложившимся условиям обстановки.

Показатели качества планирования передачи информации

При формировании правила выбора наилучшего решения будем учитывать два аспекта, наиболее существенных для системы передачи данных с использованием КА. Это, прежде всего, полнота доведения информации до потребителя, и второе – повышение срока активного существования КА.

Первому аспекту отвечают два показателя:

1) количество переданной информации конечному потребителю

$$F_1 = \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \varphi_j^l \tag{5}$$

2) количество потерянной информации

$$F_2 = \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} z_j^l \tag{6}$$

Срок активного существования КА определяется запасами энергоресурса, находящегося на объекте, расход которого связан с передачей информации. В этой связи важно планировать передачу информации таким образом, чтобы минимизировать суммарный расход ресурсов КА.

$$F_3 = \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \sum_{i \in Q_{jl}^{(-)}} p_j^l x_{ji}^l \tag{7}$$

Однако непосредственное использование показателя F_3 может привести к тому, что на некоторых КА ресурс закончится, в то время как на других КА его ещё будет значительное количество. В этой связи целесообразно учитывать на каждом шаге планирования предыдущий расход ресурса P_{0j} (предысторию), Это достигается минимизацией верхней грани (C) расходования ресурсов всех КА:

$$F_4 = \min\left\{ C \,\middle|\, P_{0j} + \sum_{l \in L} \sum_{i \in Q_{ji}^{(-)}} p_j^l x_{ji}^l < C, j \in N \right\}. \tag{8}$$

При использовании критерия (8) достигается минимизация расходования ресурсов прежде всего тех КА, которые на предыдущих шагах интенсивно участвовали в информационном обмене, что позволяет сохранить работоспособность системы в целом.

Подход к решению задачи планирования

В целом задача планирования является задачей векторной оптимизации. Компромисс между показателями диктуется конкретной обстановкой, в которой происходит управление, и определяется лицом, принимающим решение, причём в первую очередь это компромисс между группой показателей (F_1, F_2), отражающих целевые аспекты функционирования системы, и показателями F_3, F_4, отражающими технические аспекты.

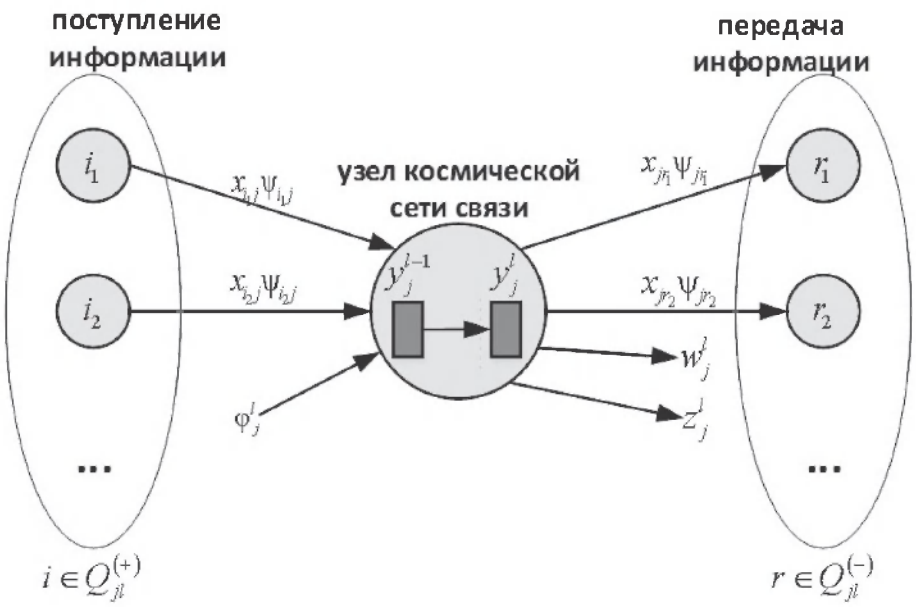

Рис. 2. Условие поступления (передачи) информации в j-й узел на l-м интервале постоянства структуры динамической сети

С учетом особенностей задачи планирования ее можно отнести к классу задач линейного программирования с двусторонними ограничениями на искомые переменные, которые могут решаться симплекс-методом. Анализ специфических особенностей матрицы условий, задаваемой ограничениями (1–4), показывает, что она имеет блочно-диагональную структуру с верхним окаймлением (рис. 3). В качестве блоков $A_1, A_2, \ldots, A_k$ выступают модели планирования передачи информации на интервалах постоянства структуры. В качестве координирующей части $A_1, A_2, \ldots, A_k$ выступают условия, связанные с использованием буферных накопителей, и условия расходования ресурса на передачу информации (4). Для решения такого рода задач были разработаны специальные алгоритмы декомпозиционного планирования, в частности алгоритм Данцига-Вулфа [10].

$$\left\| \begin{array}{cccc} A_1^0 & A_2^0 & \ldots & A_k^0 \\ \hline A_1' & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & A_2 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & A_k \end{array} \right\|$$

Рис. 3. Структура матрицы ограничений задачи планирования информационного обмена в условиях структурной динамики сети космической связи

Пример использования модели

Данные от первого абонента ($Аб_1$) необходимо передавать второму абоненту ($Аб_2$). Передача данных осуществляется с использованием НП и КА (рис. 1). Скорость передачи информации между i-м и j-м пунктами связи характеризуется величиной ψ_{ij} (ед./сек), расход электроэнергии бортового источника питания, необходимой для передачи информации с i-го КА, характеризуется величиной p (ед./сек).

В результате прогнозирования обстановки и проведения соответствующих баллистических расчетов известны:

– состав и количество КА, которые могут быть использованы для передачи информации;

– технические характеристики каналов связи;

– характеристики интервалов постоянства структуры сети связи.

Технические характеристики КА обеспечивают расход электроэнергии на борту не больше 1000 ед. для $КА_1$ и 2000 ед. для $КА_2$, $КА_3$.

Объем буферных накопителей на $КА_2$, $КА_3$ составляет 500 ед.; $КА_1$ составляет 0 ед.

В таблице 1 представлена структура возможных связей, характеристики каналов – ψ_{ij} и результаты планирования – x_{ij} на 3-х интервалах постоянства структуры и количество информации, переданной от i-го узла к j-му узлу. Использовался критерий $\max(F_1)$ (максимум информации, переданной от первого абонента второму).

В ячейках таблицы 1 сведения указаны в следующем формате $\frac{\psi_{ij}(x_{ij})}{v_{ij}}$, где ψ_{ij} – интенсивность (скорость) передачи информации между между i-м и j-м узлами связи, x_{ij}^* – полученное в результате планирования оптимальное время работы соответствующего канала связи, v_{ij} – количество переданной информации от i-м к j-м узлу связи, $v_{ij} = \psi_{ij} x_{ij}^*$. Кроме того, в таблице указаны объемы поступившей в узел информации ($\bar{r}$) и состояния бортовых запоминающих устройств КА (y).

В результате планирования передачи информации получили, что максимальный объем информации, переданной второму абоненту, составляет 16856 ед. При этом на первом интервале постоянства структуры было передано 4532 ед. информации, при этом в буфере $КА_1$ содержится еще 500 ед.; на втором интервале постоянства структуры было передано 7400 ед. информации, при этом в буферах $КА_1$ и $КА_2$ содержится по 500 ед. информации; на третьем интервале постоянства структуры было передано 4924 ед. информации.

Заключение

Анализ представленной модели планирования информационного обмена в сети связи с динамически изменяющейся структурой позволяет заключить, что соответствующая оптимизационная задача является задачей линейного программирования с двусторонними ограничениями на переменные. Вместе с тем задача имеет блочно-диагональную структуру матрицы условий, что позволяет использовать декомпозиционные алгоритмы решения, в частности алгоритм Данцига-Вулфа.

Использование модели в системно-аналитических исследованиях позволяет устанавливать связь между различными характеристиками системы и на этой основе определять рациональный облик и технические особенности построения системы передачи данных в различных условиях обстановки.

Литература

1. Калинин, В. Н. Математическое моделирование информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли / В.Н. Калинин // Труды СПИИРАН. – 2014. – № 3 (34). – С. 35–36.

2. Калинин, В. Н. Морфологический анализ проблематики математического моделирования процессов информационного взаимодействия космического аппарата с окружающей физической средой / В.Н. Калинин // Информация и Космос. – 2014. – № 1. – С. 94–104.

3. Павлов, А. Н. Структурно-параметрический синтез системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и оценка ее робастности / А.Н. Павлов,

Таблица 1

Исходные данные и результат решения задачи информационного взаимодействия

$\frac{\psi_{ij}(x_{ij}^*)}{v_{ij}}$		НП$_1$	НП$_2$	КА$_1$	КА$_2$	КА$_3$	Аб$_2$
1: T_1 = 1000 сек							
Аб$_1$		-	-	$\frac{20(\mathbf{251.6})}{5032}$	-	-	-
НП$_1$		-	-	-	-	-	$\frac{20(\mathbf{46.26})}{925.2}$
НП$_2$		-	-	-	-	-	$\frac{15(\mathbf{157.52})}{2362.8}$
КА$_1$, y=500	p_1=1.5	$\frac{4(\mathbf{231.3})}{925.2}$	$\frac{4(\mathbf{590.7})}{2362.8}$	-	$\frac{7(\mathbf{177.71})}{1244}$	$\frac{3(\mathbf{0})}{0}$	-
КА$_2$, y=0	p_2=1.0	-	-	-	-	$\frac{3(\mathbf{414.7})}{1244}$	-
КА$_3$, y=0	p_3=1.5	-	-	-	-	-	$\frac{8(\mathbf{155.5})}{1244}$
I_1		925.2	2362.8	5032	1244	1244	**4532**
2: T_1 = 1200 сек							
$\frac{\psi_{ij}(x_{ij}^*)}{v_{ij}}$		НП$_1$	НП$_2$	КА$_1$	КА$_2$	КА$_3$	Аб$_2$
Аб$_1$		-	-	$\frac{20(\mathbf{118.1})}{2362}$	$\frac{30(\mathbf{184.6})}{5538}$	-	-
НП$_1$		-	-	-	-	-	$\frac{20(\mathbf{0})}{0}$
НП$_2$		-	-	-	-	-	$\frac{15(\mathbf{253.8})}{3807}$
КА$_1$, y=500	p_1=1.5	-	-	-	$\frac{7(\mathbf{66.43})}{465}$	$\frac{3(\mathbf{632.33})}{1897}$	-
КА$_2$, y=500	p_2=1.0	-	$\frac{5(\mathbf{761.4})}{3807}$	-	-	$\frac{3(\mathbf{565.33})}{1696}$	-
КА$_3$, y=0	p_3=1.5	-	-	-	-	-	$\frac{8(\mathbf{449.13})}{3593}$
I_1		0	3807	2362	6003	3593	**7400**
3: T_1 = 900 сек							
$\frac{\psi_{ij}(x_{ij}^*)}{v_{ij}}$		НП$_1$	НП$_2$	КА$_1$	КА$_2$	КА$_3$	Аб$_2$
Аб$_1$		-	-	-	$\frac{30(\mathbf{130.8})}{3924}$		-
НП$_1$		-	-	-	-	-	$\frac{20(\mathbf{0})}{0}$

$Аб_1$		-	-	-	$\frac{30(\mathbf{130.8})}{3924}$		-
$НП_1$		-	-	-	-	-	$\frac{20(\mathbf{0})}{0}$
$НП_2$		-	-	-	-	-	$\frac{15(\mathbf{192.27})}{2884}$
$КА_1$, y=0	p_1=1.5	-	-	-	$\frac{7(\mathbf{0})}{0}$	$\frac{3(\mathbf{166.67})}{500}$	-
$КА_2$, y=0	p_2=1.0	-	$\frac{5(\mathbf{576.8})}{2884}$	-	-	$\frac{3(\mathbf{513.33})}{1540}$	-
$КА_3$, y=0	p_3=1.5	-	-	-	-	-	$\frac{8(\mathbf{255})}{2040}$
I_1		0	2884	0	3924	2040	**4924**
						Итого:	**16856**

Д.А. Павлов, А.А. Слинько // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – № 5. – С. 6–16.

4. Модель планирования операций устойчивого информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.А. Слинько [и др.] // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2016 – № 654.– С. 8–13.

5. Павлов, Д. А. Методика планирования операций информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Д.А. Павлов // Труды Военно-космической академии им. А.Ф.Можайского. – 2014. – № 649. – С. 37–47.

6. Кочкаров, А. М. Структурная динамика и исследование структурновременных характеристик дискретных систем / А.М. Кочкаров, А.А. Кочкаров, С.П. Никищенко // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2006. – № 9. – С. 235–238.

7. Ivanov, D. Dual problem formulation and its application to optimal redesign of an integrated production–distribution network with structure dynamics and ripple effect considerations / D. Ivanov, B. Sokolov, A. Pavlov // International Journal of Production Research - INT J PROD RES. – 2013. – Vol. 51, Iss. 18. – P. 5386–5403.

8. Newman, M. E. J. The structure and function of complex networks / M.E.J. Newman // SIAM Rev. – 2003. – Vol. 45. – P. 167–256.

9. Москвин, Б. В. Оптимизация передачи данных в вычислительной сети с коммутацией пакетов / Б.В. Москвин // Труды 5-ой Всесоюзной конференции КОМПАК-87, "Вычислительные сети с коммутацией пакетов". – Рига, 1987. – С. 168–171.

10. Данциг, Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения / Дж. Данциг. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с.