

Таблица 3. Значения  $\mu^{kl}$ 

Слой	$\mu^{21}$	$\mu^{31}$
1	2.5	3.2
2	1.8	2.3
3	1.7	2.0

30.04.1995 в диапазонах 1—3 (500—590 нм, 610—680 нм, 790—890 нм) приведены ниже. На снимке для эксперимента были выбраны три ЛК: лес, сельхозугодья и городская застройка и вычислены эталонные ПФП: для леса  $T_{ij}^1$ , для сельхозугодий  $T_{ij}^2$  и для городской застройки  $T_{ij}^3$  ( $i = 0, \dots, N$ ,  $j = 0, \dots, m$ ;  $N = 12$ ,  $m = 48$ ). Затем вычислялись ПФП для контрольных участков  $T_{ij}^1$ ,  $T_{ij}^2$ ,  $T_{ij}^3$  и на основании полученных данных определялись  $\Sigma^{kl}$  в соответствии с (5). Для трех слоев КС в табл. 2 приведены значения  $\Sigma_1^{11}$ ,  $\Sigma_1^{21}$  и  $\Sigma_1^{31}$ , вычисленные в соответствии с выражением (5) для информативных ПФП. В табл. 3 приведены значения  $\mu^{kl}$ , вычисленные в соответствии с (7).

Данные табл. 2 показывают, что из трех слоев снимка суммы  $\Sigma_1^{11}$  для контрольного участка и эталонных значений леса значительно меньше сумм  $\Sigma_1^{21}$  для контрольного участка сельхозугодий и эталонных значений леса, а также сумм  $\Sigma_1^{31}$  для городской застройки и эталонных значений леса. Последнее показывает целесообразность использования параметров фрактального преобразования для дешифрирования ЛК.

Ограниченный объем статьи не позволяет про-

анализировать все возможные методы дешифрирования космических изображений ЛК по структурно-текстурным признакам. В частности, возросшие за последнее время возможности вычислительной техники дали мощный толчок развитию и использованию при дешифрировании КС методов на основе нейронных сетей. Не рассмотрены вопросы фильтрации как способа предварительного преобразования изображения с целью выделения или усиления структурно-текстурных информативных признаков.

Изложенные методы будут обобщены и использованы как основа для создания многофункциональной компьютерной программы дешифрирования ЛК на КС по структурно-текстурным признакам.

1. Викторов А. С. Рисунок ландшафта. — М.: Мысль, 1986.— 180 с.
2. Николаев В. А. Проблемы регионального ландшафтоведения. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979.— 160 с.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М., 1978.—848 с.
4. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Новиков и др. Дешифрирование космических снимков: распознавание ландшафтных зон на основе структурного анализа // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 39—45.
5. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Рябоконеко С. А. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов с использованием марковской модели изображений // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 80—84.
6. Янутш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М: Недра. 1991.—240 с.
7. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE.—1979.—67, N 5.—P. 786.
8. Rabiner L. R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition // Proc. IEEE.—1989.—77, N 2.—P. 257—285.

## Имитационное моделирование космических исследований постановка задачи и пути решения

ДЗЗ:

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Проведение космических исследований по научно-прикладной программе ДЗЗ занимает продолжительное время и связано со значительными материальными затратами. Поэтому важно иметь возможность предварительно и в процессе проведения космических исследований — космического экспе-

римента (КЭ) ДЗЗ проводить имитационное моделирование процесса функционирования всей системы ДЗЗ.

Имитационное моделирование КЭ будем рассматривать как методологию прогнозирования сценариев развития системы ДЗЗ с учетом взаимодействия

всех уровней составляющих систему: тематических задач ДЗЗ, орбитальных параметров космического аппарата, состава бортового приборного комплекса, каналов связи и наземной инфраструктуры.

Задача состоит в разработке имитационной модели КЭ в системе ДЗЗ на основе системного подхода [2]. Последний является одним из способов определения количественных и качественных характеристик системы ДЗЗ (эффективности существующих и перспективных КА, качества решения тематических задач), принятия рациональных решений по эксплуатации и развитию системы ДЗЗ, коррекции ошибок управления.

Стратегия применения космических средств зондирования связана с решением конкретных научных и народнохозяйственных задач, определяется динамикой процессов, происходящих на земной поверхности и в околоземном пространстве. Эти процессы и задачи носят либо пространственно локальный характер (например, поиск полезных ископаемых, прокладка железнодорожных магистралей, провод судов в сложной ледовой обстановке, обследование определенных районов для размещения экологически нечистых производств), либо глобальный (зондирование воздушного бассейна и прогноз погоды, решение задачи землепользования и картографирования, контроль зарождения пожаров и цунами, исследования состояния лесных массивов и сельскохозяйственных угодий, прибрежного шельфа, загрязнения океанских просторов и воздушного бассейна). Значительная временная неоднородность протекания наблюдаемых с помощью ДЗЗ процессов позволяет говорить о плановом (исследование месторождений полезных ископаемых, картографирование); периодическом (метеослужба и прогноз погоды) и оперативном (стихийные бедствия, землетрясения, наводнения) типах зондирования. При этом должны учитываться такие требования к системе ДЗЗ, как:

- соответствие параметров аппаратуры информационным признакам (характеристикам) тематических задач,
- покрытие районов зондирования,
- совместимость работы аппаратуры,
- возможность отказов и ресурс аппаратуры,
- пропускная способность каналов радиосвязи,
- размещение наземных зон приема информации,
- оптимизация продолжительности маршрутов,
- рациональное распределение ресурсов и др.

Имитационная модель должна позволить оптимизировать систему ДЗЗ по критериям информативности, производительности и оперативности. В модели должна быть обеспечена возможность для выполнения многократных < прогонов >, для исследования различных сценариев и возможных ситуа-

ций и сбора статистических данных.

Для построения динамических моделей управляемых систем широко используется метод системной динамики, в котором управление процессом получения информации включает в себе несколько этапов [3, 5]. Наиболее важными среди них следует считать прогноз возможных сценариев развития, принятие решения о выборе одного из возможных сценариев и выполнение операций, необходимых для осуществления выбранного сценария. Информация о том, насколько планируемый сценарий процесса отличается от фактического, позволяет вводить поправки не только в систему управления, но и пересматривать установленные ранее цели с точки зрения их практической реализуемости. В методе системной динамики при моделировании сложного комплекса выполнения задач ДЗЗ система рассматривается как конкретный объем сведений (информации) относительно той проблемы, для решения которой вводится данная система. В качестве исходной информации для выбора параметров, характеризующих движение к поставленным целям, будем использовать целевые установки функционирования. Цели функционирования через выбранный для их представления вектор состояния определяют основной набор элементов, из которых должна быть составлена система. Структура системы формируется соединением элементов путем использования информации о связях между ними. Элементы, которые не входят в вектор состояния, позволяют более детально представить связи системы с «внешним миром». Граница системы проходит там, где появляются такие связи, которые воздействуют на элементы системы, не встречая ответной реакции со стороны самой системы. Внешнее воздействие на внутренний элемент передается другим элементам системы и формирует сценарий ее развития.

Назовем основные концепции системного анализа, которые позволят построить информационную технологию управляемого развития [1]. Относительность целей состоит в том, что целевые установки неизбежно претерпевают изменения в процессе управления развитием и требуют постоянной адаптации. Целостность управляемой системы заключается в том, что ее вектор состояния должен содержать минимальный набор параметров, необходимых для контроля движения к целям. Причинность говорит о том, что всякое изменение состояния системы, должно рассматриваться как следствие некоторого влияния на систему. Подчиненность свидетельствует об иерархическом построении управляемых систем. Динамический баланс постулирует устойчивость управляемых систем, при наличии внешнего воздействия на систему не происходит ее разрушения. Информационное единство

предполагает, что для управления должна быть использована вся доступная информация о состоянии системы, усвоение системой информации, полученной в наблюдениях, позволяет адаптировать к реальности выбранный сценарий и целевые установки.

Наиболее распространены три способа описания управляемых систем: словесный (вербальный), концептуальный (графический, в виде диаграммы) и формальный (в виде уравнений и формул). Каждое из этих описаний дает соответствующую модель системы. Возможные сценарии развития способна обеспечить только формальная модель с динамическими уравнениями, созданию которой предшествует построение ее концептуальной модели. Концептуальная модель разрабатывается на основе вербального описания проблемы устойчивого развития и целевых установок. Поэтому процесс получения возможных сценариев развития состоит из последовательного использования всех трех форм описания управляемой системы.

Метод системной динамики имеет свои ограничения, состоящие в отсутствии алгоритмов нахождения функций, определяющих связи между элементами системы, а также отсутствии адаптации моделей к статистике отклонений модельных сценариев от фактических. Метод, который использует основные преимущества метода системной динамики и учитывает возможности адаптации сценариев развития к наблюдениям, называется «адаптивный баланс влияний». Название подчеркивает решающую роль адаптации к наблюдениям как модели управляемой системы, так и целевых установок развития. Английский вариант названия метода Adaptive Balance of Causes (ABC) [1].

Суть ABC-метода заключается в следующем. Предположим, что управляемая система состоит из универсальных модулей, каждый из которых находится в состоянии динамического равновесия. Равновесие поддерживается функциями влияния, связывающими данный модуль с другими модулями системы. Внутри системы сохраняется режим динамического баланса влияний, под управлением внешнего воздействия на систему.

ABC-метод позволяет моделировать решение практических задач управления устойчивым развитием сложных систем путем следующих операций:

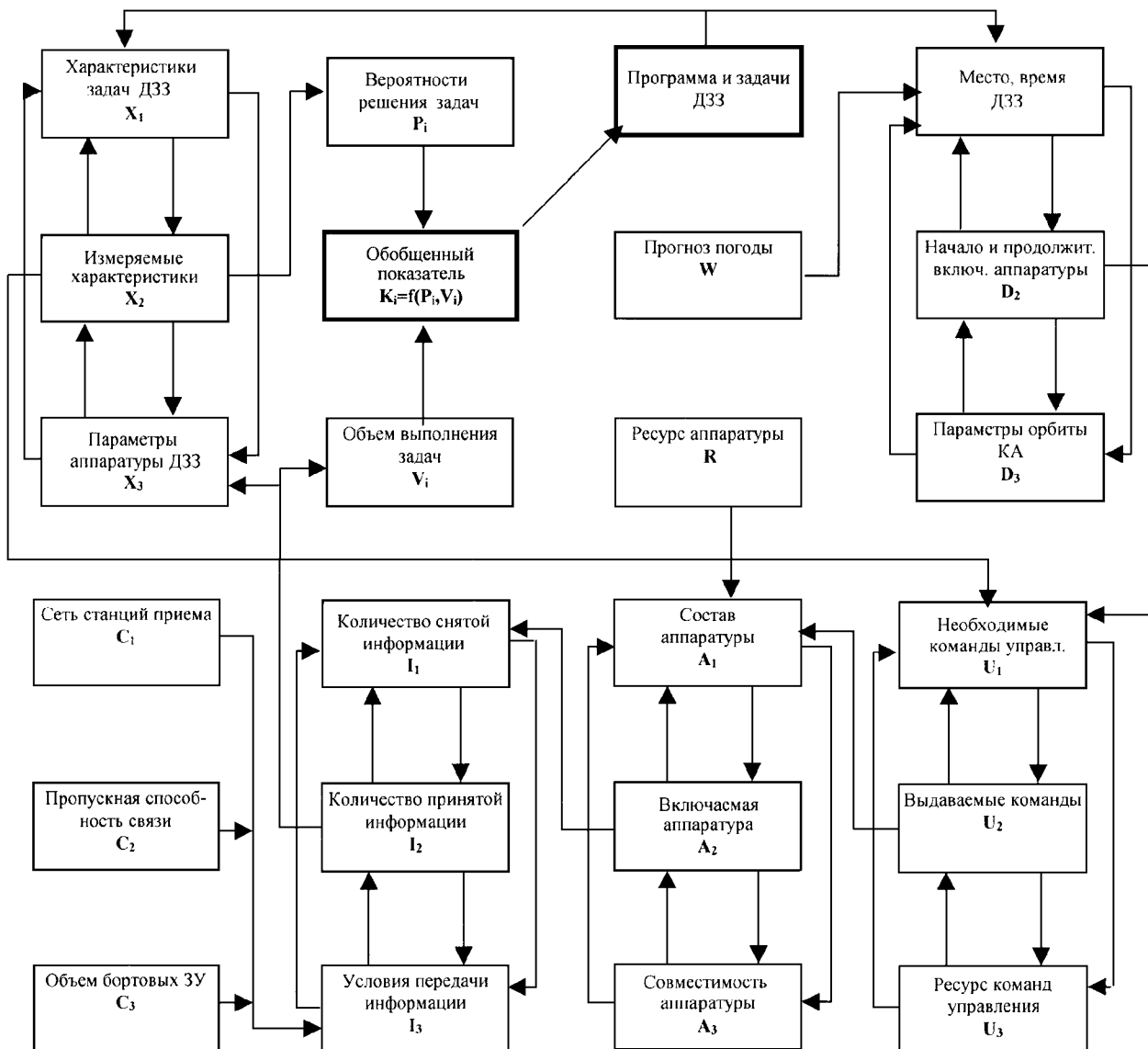
- создания унифицированного модуля из элементов управляемой системы, которые являются параметрами ее вектора состояния,
- определения взаимных влияний модулей для объединения их в структуру концептуальной модели системы,
- разработки метода оценки взаимных влияний модулей по информации о фактических сценариях развития системы.

Концепция декомпозиции и синтеза предполагает разложение сложной системы, моделирующей комплекс для решения задач на основе ДЗЗ, на отдельные подсистемы с последующим выбором из них наиболее важных с точки зрения целей управления. Объединение выбранных подсистем в общую структуру модели управления выполнением задач ДЗЗ производится с учетом установленных экспертами причинно-следственных зависимостей.

С этих позиций рассмотрим возможный вариант построения концептуальной модели космических исследований ДЗЗ с иллюстрацией причинно-следственных связей (рисунок).

Модель включает следующие модули:  $X_1$  — характеристики задач программы ДЗЗ,  $X_2$  — измеряемые характеристики,  $X_3$  — параметры аппаратуры ДЗЗ,  $D_1$  — место и время зондирования (интенсивность потока зондируемых районов),  $D_2$  — начало и продолжительность включения аппаратуры,  $D_3$  — параметры полета космического аппарата (КА),  $U_1$  — команды управления, необходимые для выполнения задач ДЗЗ,  $U_2$  — выдаваемые команды управления,  $U_3$  — ресурс команд управления,  $A_1$  — требуемый состав аппаратуры ДЗЗ,  $A_2$  — включаемая аппаратура,  $A_3$  — ограничения по совместимости работы различных блоков аппаратуры, по максимальной длительности непрерывной работы аппаратуры и по минимальному времени после предыдущего включения,  $I_1$  — количество снятой информации,  $I_2$  — количество информации, принятой на пунктах приема информации (ППИ),  $I_3$  — пропускная способность каналов связи и сети станций приема,  $R$  — ресурс бортовой аппаратуры,  $P_1$  — вероятности решения задач ДЗЗ,  $V_1$  — объем выполнения заявки ДЗЗ,  $K_1 = f(P_1, V_1)$  — общий показатель выполнения программы ДЗЗ,  $W$  — прогноз погоды.

Элемент системы планирования КЭ в системе ДЗЗ, представленный в блоках  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , строится на взаимодействии возможностей  $X_3$  аппаратуры ДЗЗ разрабатываемого (действующего) КА и требований  $X_1$  пользователей информации ДЗЗ. Пользователь стремится получить информацию с характеристиками, которые требуются для решения его задач, значения параметров аппаратуры КА обусловлены техническими и экономическими возможностями. Результатом баланса интересов являются зондируемые характеристики  $X_2$ . Внешним воздействием на элемент системы  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  являются задачи программы ДЗЗ. Блок  $X_2$  вырабатывает внешнее воздействие на блок  $U_1$  и определяет один из показателей выполнения программы ДЗЗ — вероятности  $P_1$  решения задач ДЗЗ.



Концептуальная модель космических исследований ДЗЗ

Оценка эффективности выполнения программы ДЗЗ производится в соответствии с полученным на основании системного подхода значением вероятности решения поставленных задач ДЗЗ заданным составом аппаратуры КА [3]. По вычисленным вероятностям производится определение состава аппаратуры, которая должна производить измерения с борта КА.

Программа ДЗЗ, как внешнее воздействие на элемент, включающий блоки  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , определяет для  $D_1$  координаты зондируемых территорий Земли при указанной дате съемки и допустимом

угле Солнца. При определении времени включения аппаратуры необходимо учитывать также прогноз погоды  $W$ . КА осуществляет облет Земли по орбите с заданными характеристиками  $D_3$ . В результате учета указанных факторов определяется время включения аппаратуры  $D_2$  из условия нахождения КА над указанными территориями и в определенные интервалы суточного времени. Блок  $D_2$  задает внешнее воздействие на блок  $U_1$  системы управления.

Траектория полета КА является функцией следующих параметров: высота круговой орбиты  $h$ , на-

клон орбиты  $\gamma$ , период вращения  $T$ , время  $t$ . Положение аппарата может быть определено в географических координатах широты  $\varphi$  и долготы  $\lambda$ , задаваемых функциями параметров орбиты. Условие нахождения КА в месте зондирования, определяемом требованиями задачи, записывается в виде равенств

$$\varphi(\gamma, h, T, t) = \varphi_z, \lambda(\gamma, h, T, t) = \lambda_z, t = t_{c_z}, \quad (1)$$

где  $\varphi_z, \lambda_z$  — координаты начала зондирования и  $t_{c_z}$  — суточное время, заданные в программе ДЗЗ. Исходя из размеров зондируемого участка, определяется продолжительность зондирования  $\Delta t$ . Прогноз погоды является функцией времени  $W(t)$ , накладывающей ограничения на условия (1). Функция  $W(t)$  имеет вид  $W(t) = 0$  при неблагоприятном для ДЗЗ прогнозе и  $W(t) = 1$  при благоприятном.

Перечень измеряемых характеристик и время зондирования являются внешними входными данными блока баланса управления. Команды управления на включение необходимой аппаратуры ДЗЗ  $U_2$  определяются в блоках  $U_1, U_2, U_3$  как баланс внешнего воздействия от блоков  $X_2, D_2$ , внутренних взаимодействий и ресурса команд  $U_3$  аппаратуры управления. Блок  $U_2$  является внешним воздействием на блок  $A_1$  и задает время включения необходимых приборов ДЗЗ.

Наземный комплекс управления в соответствии с его техническими характеристиками имеет определенный ресурс команд управления работой аппаратуры ДЗЗ ( $U_3$ ) и содержит разовые команды в сеансе связи в количестве  $N_{\text{РК}}$ , программные в количестве  $N_{\text{РК}}$  и программные в цикле управления в количестве  $N_{\text{ПКУ}}$ .

В блоке  $U_1$  производится перевод характеристик, подлежащих зондированию в определенное время, в соответствующий набор команд управления. Набор команд сортируется в соответствии с их приоритетом и сравнивается с ресурсом команд управления  $U_3$ . В случае недостаточного ресурса команд управления производится отбор команд с высшим приоритетом, которые обозначаются как  $U_2$ , при достаточном ресурсе — выполняется условие  $U_2 = U_1$ .

Выбор включаемой аппаратуры ДЗЗ  $A_2$  производится как баланс заявки на зондирование  $A_1$  с учетом ресурса аппаратуры  $R$  и возможности совместной работы необходимых приборов и продолжительности этой работы  $A_3$ .

Возможность включения аппаратуры определяется из логических уравнений совместимости с другой аппаратурой, оценки времени после предыдущего включения, длительности настоящего включения и ресурса аппаратуры.

Необходимость включения аппаратуры  $A^i, A^j$  задается функциями  $A^i(t), A^j(t)$  следующего вида  $A^i(t) = 1, A^j(t) = 1$ , при включенной аппаратуре и  $A^i(t) = 0, A^j(t) = 0$ , при выключенной аппаратуре. Совместное включение различной аппаратуры выражается функцией  $A^{ij}(t) = A^i(t) \cap A^j(t)$ . Если для всех значений  $t$  функция  $A^{ij}(t) = 0$ , то в процессе выполнения программы ДЗЗ аппаратура  $A^i, A^j$  совместно не включается. Если имеются значения  $t$ , для которых  $A^{ij}(t) = 1$ , это свидетельствует о необходимости проверки условия возможности совместной работы. При запрещенной совместной работе аппаратуры  $A^i, A^j$  принимается решение о включении только той аппаратуры, которая обеспечивает решение задач высшего приоритета.

При необходимости включения аппаратуры  $A^i$  требуется проверить, сколько прошло времени  $A^i(t_0 - t_v)$  после предыдущего выключения этой аппаратуры. Аппаратура может быть включена при условии, что  $A^i(t_0 - t_v) > A^i(\min_v)$ .

После включения аппаратуры  $A^i$  должна производиться оценка длительности функционирования при данном включении в соответствии с выражением  $A^i(\Delta t) = \sum_{t_0} A^i(t)$ , при условии  $A^i(\Delta t) > A^i(\max)$

аппаратура  $A^i$  выключается. Также должна определяться полная наработка времени аппаратурой  $A^i$  согласно выражению  $A^i(T) = A^i(T_0) + \sum_{t_0} A^i(t)$ . Нера-

венство  $A^i(T) > A^i(\max)$  является условием того, что ресурс аппаратуры  $A^i$  исчерпан.

Количество принятой с борта КА информации  $I_2$ , определяется как результат динамического баланса между количеством снимаемой информации  $I_1$  и условиями передачи информации  $I_3$ . Режим передачи информации обусловлен взаимным положением зондируемых территорий и сетью станций приема  $C_1$ , пропускной способностью бортовой аппаратуры связи  $C_2$  и объемом бортовых запоминающих устройств  $C_3$ .

Оценка возможности передачи снимаемой информации производится исходя из взаимного расположения снимаемой территории и станций приема информации ДЗЗ. Для  $i$ -го района зондирования с широтой и долготой  $\varphi_z^i, \lambda_z^i$  вычисляются расстояния до ППИ в соответствии с выражением

$$R(\varphi_z^i, \lambda_z^i | \varphi_p^j, \lambda_p^j) = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2}, \quad (2)$$

где

$$Z_1 = (r_z^i - r_p^j), Z_2 = (r_z^i)(i\varphi_z^i - \varphi_p^j), \\ Z_3 = (r_z^i \sin \varphi_z^i)(\lambda_z^i - \lambda_p^j).$$

Также определяется  $j$ -я станция приема с координатами  $\varphi_p^j, \lambda_p^j$ , расстояние до которой наименьшее:

$$\min_j [R(\varphi_Z^j, \lambda_Z^j | \varphi_P^j, \lambda_P^j)]. \quad (3)$$

Затем определяется условие нахождения КА в зоне покрытия этой станции приема, определяемое следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} \varphi_P^j - \Delta\varphi_P^j < \varphi_Z^j < \varphi_P^j + \Delta\varphi_P^j, \\ \lambda_P^j - \Delta\lambda_P^j < \lambda_Z^j < \lambda_P^j + \Delta\lambda_P^j, \end{aligned} \quad (4)$$

где значения  $\Delta\varphi_P^j$ ,  $\Delta\lambda_P^j$  определяют зону видимости КА по двум координатам. При выполнении двух условий (4) производится непосредственная передача зондируемой информации, в противном случае — запись в запоминающее устройство (ЗУ).

Возможность записи снимаемой информации зависит от размера территории ДЗЗ и объема ЗУ. Снимаемая площадь в зависимости от пространственного разрешения и разрядности информации для каждого канала требует  $a(A^i) \times b(A^i) \times m(A^i)$  пикселов и условием полной записи в ЗУ (суммарной емкости  $E$ ) зондируемой информации является  $\sum_i a(A^i)b(A^i)m(A^i) \leq E$ , где  $a(A^i) \times b(A^i)$  — количество пикселов в изображении аппаратуры  $A^i$ ,  $m(A^i)$  — разрядность канала  $A^i$ .

Возможность передачи информации зависит от объема передаваемой информации (несколько каналов связи) и пропускной способности каналов. Снимаемая или записанная в ЗУ информация во время сеанса связи передается на землю через каналы связи с пропускной способностью  $V^i$  в течение времени сеанса  $t^i$ . Передача всей зондируемой и записанной в ЗУ информации в сеансе связи возможна при условии  $\sum_i a(A^i)b(A^i)m(A^i) \leq \sum_i V^i t^i$ .

Если последнее условие не выполняется, то в первую очередь производится непосредственная передача зондируемой информации, затем возможное

количество из ЗУ, а затем производится поиск следующей ближайшей станции приема в соответствии с выражениями (2), (3).

Блок  $I_2$  является показателем количества принятой информации ДЗЗ и определяет объем выполнения задач ДЗЗ  $V^i$ , который учитывается в обобщенном показателе  $K_{ij}$ . Этот показатель определяет обратную связь на программу и параметры аппаратуры ДЗЗ.

Дальнейшим шагом построения концептуальной модели КЭ в системе ДЗЗ на основе метода адаптивного баланса влияний является формализация модели путем составления соответствующей системы уравнений.

Полученный опыт использования метода системной динамики [4] и проведенные нами предварительные исследования показали, что системный подход может быть применен в качестве инструмента при имитационном моделировании и разработке информационной технологии оценки состояния и управления устойчивым развитием космической системы ДЗЗ.

1. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.—224 с.
2. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978. — 271 с.
3. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія.— 2001.—7, № 5/6.— С. 75—79.
4. Федоровский А. Д., Тимченко И. Е., Сиренко Л. А., Якимчук В. Г. Об эколого-экономической модели комплексного водопользования в гидроэнергетике // Доповіді Національної академії наук України.—2001.—1. С. 140—143.
5. Forrester J. W. Industrial Dynamics. Cambridge MA, Productivity Press. 1961.