

Оптимизация процессов принятия решений в экспертных системах планирования работы целевой аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Н.Н. Куссуль¹, С.Л. Янчевский², А.Н. Кравченко¹

¹Институт космических исследований НАНУ-НКАУ,
03187 Киев, просп. Глушкова, 40, корп. 4/1
E-mail: inform@ikd.kiev.ua;

²Киевский оперативный центр, Национальное космическое агентство Украины (НКАУ)
01010, г.Киев, ул. Московская, 8
E-mail: jsl_m@mail.ru, yanchevskiy@nkau.gov.ua

В работе предложен подход к решению задач планирования космической съемки на основе методов много-ритериальной оптимизации и геопространственного интеллекта. Частные критерии оптимизации определяют степень удовлетворения потребностей конкретных ведомств в спутниковой информации и формируются на основе экспертного оценивания с использованием геопространственного анализа нечеткой экспертной информации. В результате свертки частных критериев строится трехмерная поверхность обобщенных потребностей ведомств, двумерная проекция которой может быть использована в системе поддержки принятия решений процесса планирования съемки для КА «Сич-2».

Ключевые слова: планирование космической съемки, многокритериальная оптимизация, нечеткая логика, геопространственный интеллект.

Введение

Имеющиеся подходы к планированию съемки земной поверхности космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) до сих пор ориентируются на КА прошлых поколений, которые имели невысокую производительность и использовались преимущественно для нужд оборонных ведомств и, по остаточному принципу, для гражданских потребностей. Увеличение возможностей КА ДЗЗ совпадает со значительным увеличением спроса на их информацию. Данные ДЗЗ все более затребованы МЧС, Минагрополитики, Минэкологии, Госкомземом и т.д. (Янчевский, 2010). Выполнить своевременно все заявки от такого количества потребителей, интересы которых могут не совпадать, достаточно сложно.

Соответственно, усложняется процесс планирования съемок КА ДЗЗ. Систем поддержки принятия решений для выполнения таких работ в Украине практически нет. Лицам, принимающим решение (ЛПР), приходится по собственному усмотрению ранжировать заявки, полученные на всех этапах планирования. На ЛПР в процессе планирования работы КА ДЗЗ возлагается все большая нагрузка и ответственность. Современная система планирования является практически полностью экспертной системой. Для ее улучшения необходимы новые алгоритмы планирования работы целевой аппаратуры спутников ДЗЗ.

В 2011 году НКАУ планирует запустить КА ДЗЗ «Сич-2». Один КА не сможет удовлетворить потребности всех заинтересованных министерств и ведомств, однако, оптими-

зация использования целевой аппаратуры КА «Сич-2» позволит выполнить максимально возможное количество заявок потребителей из разных ведомств (Куссуль и др., 2011). При этом особую актуальность обретают подходы, дающие возможность формализации и проведения соответствующих вычислений с использованием совокупного опыта ЛПР. Очевидно, что такие экспертные знания имеют «нечеткую природу», что еще более усложняет задачу. Интересы органов исполнительной власти (ОИВ) относительно данных ДЗЗ в определенные периоды времени могут не совпадать и порождать перманентный конфликт, решение которого, как правило, заключается в рациональном планировании работы целевой аппаратуры КА. Для решения этой задачи необходимо оценить заинтересованность каждого ОИВ в данных ДЗЗ на общий район интереса (в нашем случае территория Украины). Это позволит принять оптимальное решение при наличии заявок и обеспечит эффективную работу целевой аппаратуры на т.н. «холостых» витках (при отсутствии заявок), или при наличии свободного ресурса КА ДЗЗ. В этой связи, планирование предлагается проводить на основе данных экспериментного опроса.

Существующие алгоритмы перспективного и долгосрочного планирования достаточно полно рассмотрены в работе (Пясковский, 1998), отдельные подходы к планированию работы КА ДЗЗ рассмотрены в монографиях (Лебедев и Несторенко, 1991), оригинальная методика планирования работы бортовой целевой аппаратуры (ЦА) предложена в статье (Машков, Фриз, 2003). Однако все эти научные работы не обеспечивают решения проблем, обусловленных упомянутыми выше тенденциями в развитии и планировании работы современных систем ДЗЗ. Для комплексного решения этих проблем необходимо применять методы многокритериальной оптимизации (Воронин и др., 1997) и системного анализа (Згуровский и Панкратова, 2005). В работах (Янчевский, 2010; Куссуль и др., 2011) предложен подход к многокритериальной оптимизации планирования покупки спутниковых снимков низкого и среднего разрешения с учетом потребностей различных ведомств, а также имеющихся финансовых ограничений. Подход основывается на оптимизации векторозначной функции степени удовлетворения нужд ОИВ, заинтересованных в использовании спутниковой информации. В основу предложенного подхода положены функции потребностей ведомств, которые строятся по результатам экспериментного опроса. Однако в случае использования данных высокого разрешения эксперты должны определить не только ориентировочное время съемки, но и конкретизировать территорию, которая представляет наибольший интерес.

Поэтому в данном случае частные критерии оптимизации, которые определяются уровнем удовлетворения нужд ведомств, зависят от векторного аргумента. Соответственно, в ходе экспериментного опроса и обработки оценок возникает необходимость оценки геопространственной информации субъективного характера. Для решения такой задачи целесообразно использовать методы геопространственного интеллекта (Bacastow and Bellafiore, 2009). В тоже время, для формализации неопределенности субъективного характера целесообразно использовать математический аппарат теории нечетких множеств (Zadeh, 1975). В данной работе формулируется задача многокритериальной оптимизации плана космической съемки для КА ДЗЗ высокого разрешения «Сич-2» с учетом потребностей различных ОИВ и имеющихся технических ограничений. Для построения функции потребностей государственных ведомств применены методы экспериментального опроса, а для обработки результатов предлагается использовать методы геопространственного интеллекта и теории нечетких множеств.

Содержательная постановка задачи многокритериальной оптимизации плана съемки

Пусть задана определенная территория (в нашем случае Украина и приграничные территории), относительно которой необходимо составить оперативный план космической съемки для КА ДЗЗ «Сич-2» с учетом всей совокупности заявок от ОИВ.

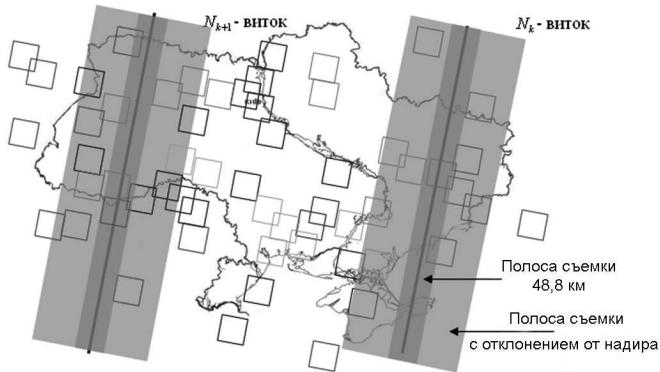


Рис. 1. Вариант заказа на съемку от разных министерств и ведомств (МЧС, Минприроды, Минагрополитики и т.д.)

Для этой территории формируется определенное количество заявок, которые должны быть выполнены почти в одно и то же время (рис.1). Исходя из ТТХ КА «Сич-2», полоса съемки аппарата составляет 48,8 км (ТТЗ на КС «Сич-2», 2002). Соответственно размер кадра составляет 48,8x48,8 км, полосы – 48,8x300 км. Учитывая возможности КА относительно проведения съемки с отклонением от надира, полоса захвата может быть расширена до 500 км с ухудшением разрешения с 8,2 м до 15 м. Однако, даже при таких условиях выполнить все заявки в назначенный срок с полным удовлетворением нужд ОИВ практически невозможно.

Поэтому возникает задача составления плана съемок с отклонением КА от надира в интересах наиболее заинтересованных и наиболее важных потребителей. Ввиду необходимости одновременно удовлетворить нужды нескольких ведомств, поставленная задача является многокритериальной задачей оптимизации, в которой, аналогично работе (Янчевский, 2011), частными критериями оптимальности является среднеквадратичное отклонение от функций потребностей конкретных ведомств. Но в данном случае множество возможных решений определяется не только временами съемки, но и географическими координатами. Т.е. частичные критерии являются скалярными функциями векторного аргумента, а множество возможных решений $X \subset E^3$ состоит из векторов $x = \{x_i\}_{i=1}^3$ трехмерного Эвклидова пространства, где x_1, x_2 – географические координаты центра сегмента, который снимается, $x_3 = t$ – время съемки.

Учитывая особенности функционирования КА, решение на планирование съемок принимается с учетом внешних влияний, которые опишем вектором r заданным на множестве возможных факторов R . Под внешними влияниями будем понимать статистические и прогнозистические данные относительно условий съемки, например облачности. Ситуация, которая оценивается при планировании в результате принятия многокритериального решения на проведение съемки x в заданных условиях r , характеризуется декартовым произведением $C = X \times R$. Ставится задача обеспечения наивысшей эффективности космической съемки при максимально возможных объемах получения снимков с наиболее возможным соблюдением интересов ОИВ.

Качество решения оценивается по совокупности частных критериев определяющихся целевыми функциями потребностей конкретных ведомств-потребителей, которые формируют s -мерный вектор $y(x) = \{y_k(x)\}_{k=1}^s \subset F$. Выражение $y \subset F$ означает принадлежность вектора потребностей y к классу F допустимых векторов эффективности выполнения съемки.

Математическая постановка векторной задачи оптимизации

В задаче оптимизации планирования съемки для аппаратов высокого разрешения, раз мерность вектора независимых переменных равна 3. То есть множество возможных решений относительно проведения съемки $X \subset R^3$ состоит из векторов $x = \{x_i\}_{i=1}^3$ трехмерного Эвклидова пространства, где x_1, x_2 – географические координаты центра сегмента, который снимается, а $x_3=t$ – время съемки.

Задача многокритериальной оптимизации плана проведения космической съемки состоит в определении такого решения $x^* \in X$, которое при заданных условиях, связях и ограничениях оптимизирует векторозначную функцию эффективности планирования зависящую от векторного аргумента

$$x^* = \arg \min_{x \in X} f(x) = \arg \min_{x \in X} (\hat{y}(x))^2 \quad (1)$$

при заданных условиях $r \subset R$ и ограничениях

$$\hat{s}(\hat{y}(x)) \leq S \quad (2)$$

которые для данного КА обусловлены техническими характеристиками целевой аппаратуры «Сич-2». В соотношении (1) $y(x) = \{y_k(x)\}_{k=1}^s$ – это векторозначная функция

потребностей ведомств в спутниковой информации, $\hat{y}(x) = \{\hat{y}_k(x)\}_{k=1}^s$ – реальная степень удовлетворения потребностей ведомств в информации ДЗЗ.

В (2) $s(\hat{y}(x))$ – это объем информации, который определяется количеством возможных снимков, $S \in R$ – имеющийся бортовой ресурс (объем бортового запоминающего устройства) КА «Сич-2», который составляет 2 ГБт. В частности, объем бортового запоминающего устройства (БЗУ) заполняется информацией за 89 с съемки. При условии, что получение одного снимка занимает до 7 с, КА «Сич-2» может отснять за один проход не более 12 отдельных снимков, или две сплошные полосы до 300 км. Соответственно, возникает потребность рационального распределения этого ресурса между потребителями (ведомствами). В этой ситуации, векторным критерием задачи оптимизации является квадрат нормы отклонения реальной степени удовлетворения потребностей ведомств в данных ДЗЗ от целевой функции потребностей при заданных технических ограничениях. Минимизируя отклонение от целевой функции, мы обеспечиваем максимальную эффективность съемки.

Для определения оптимальных схем проведения съемок КА ДЗЗ составим набор частных критериев. Такие критерии представляют собой количественные показатели, числовые значения которых является мерой качества системы управления (Воронин и др., 1997). Качество системы управления КА ДЗЗ в части его целевого использования, в целом, зависит от рациональности планирования съемки с учетом ограничений, которые накладываются условиями функционирования КА на орбите, объемами и сроками выполнения заявок.

Метод решения задачи

Векторный критерий оптимизации отображает отклонение от функций потребностей заинтересованных ОИВ в информации ДЗЗ в определенном временном интервале с учетом технических ограничений. Значение целевых функций на дискретные моменты времени определяется по результатам опроса экспертных групп специалистов ОИВ, заинтересованных в получении информации ДЗЗ.

Решение поставленной задачи многокритериальной оптимизации предусматривает выполнение следующих этапов (Воронин и др., 1997): формирование частных критериев; определение областей согласия и областей компромиссов; нахождение в области компромиссов решения, которое удовлетворяет условию оптимальности Парето, путем нормализации частных критериев, учета приоритетности ведомств, выбора схемы компромиссов и получения паретооптимального решения.

Частными критериями качества оптимального планирования съемки следует считать степень удовлетворения потребностей в получении информации ДЗЗ на определенном интервале времени для каждого из заинтересованных ведомств с учетом ограничений, которые накладываются ситуацией С. Ситуация в конкретный момент времени определяется следующими факторами (ограничениями): расчетной оптической видимостью районов съемки (E); геометрической видимостью (K); прогнозируемой (статистической) видимостью районов съемки (γ).

Расчетная оптическая видимость районов съемки определяется по классическим методикам, исходя из количества рабочих витков над определенным районом, величины освещенности и состояния атмосферы над этой территорией (Ханцеворов и Острорухов, 1989). Геометрическая видимость определяется положением космического аппарата (прохождением трассы КА) над заданным районом и, соответственно, накрытием полем зрения аппаратуры БСК одной или нескольких областей интереса. Методика расчета геометрической видимости достаточно полно изложена в работе (Ханцеворов и Острорухов, 1989).

Прогнозируемая (статистическая) видимость районов съемки определяется на основе имеющейся статистики относительно конкретной территории (среднее соотношение солнечных и облачных дней). На каждую точку общей зоны интереса можно получить определенный коэффициент или прогнозируемую (статистическую) достоверность отсутствия облачности для успешного проведения космической съемки районов интереса. Рассмотрим детальнее этап формирования частных критериев.

Формирование частных критериев

Подобно скалярной задаче многокритериальной оптимизации плана закупки данных низкого разрешения (Янчевский, 2011), функции потребностей конкретных ведомств, а значит и частные критерии в (1), формируются на основе экспертного опроса. Членами таких экспертных групп должны быть опытные специалисты ОИВ имеющие четкое понимание того, сколько, по какой территории, с какой оперативностью, на какой отрезок времени необходимо видовой информации для выполнения задач данным ведомством. Поставленная задача решалась с учетом потребностей трех ведомств: МЧС, Минприроды и Минагрополитики. С целью выяснения реальной потребности этих ОИВ в данных с КА «Сич-2» на

протяжении года, а также определения степени важности проведения космических съемок по определенным участкам территории Украины и пограничной полосы, в этих ведомствах были сформированы группы экспертов и проведено анкетирование. Количество экспертов в каждой из групп равнялось пяти.

Ситуация усложняется тем, что эксперты должны были определить не только приоритетное время съемки, но и территорию, которая составляет наибольший интерес. Поэтому для экспертного опроса такого рода оказались неприменимы традиционные способы анкетирования, которые позволяют экспертам оперировать символной или числовой информацией (Смохвалов и Науменко, 2007). Высокое разрешение снимков КА приводит к необходимости учета геопространственной информации в экспертном оценивании и применения для ее обработки методов геопространственного интеллекта (Bacastow and Bellafiore, 2009). Поэтому была разработана анкета специального вида, которая позволяла за короткий срок конкретизировать области интереса. Так была получена базовая информация для проведения планирования на весь год (по месяцам). Каждый эксперт, используя фломастеры красного, синего и зеленого цветов, должен был нанести на схематические контурные карты Украины районы интереса, относительно которых имеется особая заинтересованность его ведомства в получении космических снимков (по месяцам года). Каждый район интереса выделялся контуром определенного цвета (рис. 2) со следующими семантическими значениями:

- «красный» – очень высокая потребность в получении данных
- «синий» – высокая потребность в получении данных
- «зеленый» – средняя потребность в получении данных

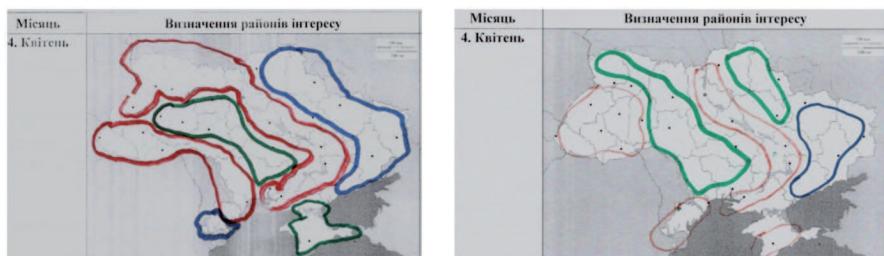


Рис. 2. Примеры заполненных экспертами МЧС анкет (на апрель)

Из рис. 2 видно, что результаты анкетирования являются весьма субъективными и часто могут противоречить друг другу. Кроме того, при нанесении информации вручную, невозможно точно определить границы областей интереса. Поэтому возникает необходимость определения математического аппарата позволяющего формализовать и обобщить геопространственные данные экспертного опроса с учетом их субъективности. В мировой практике для решения подобных задач используются методы геопространственного интеллекта, в т.ч. с использованием аппарата нечеткой логики.

Анализ экспертной информации на основе методов геопространственного интеллекта

Основным математическим аппаратом формализации представления и обработки экспертных оценок и высказываний является теория нечетких множеств (Zadeh, 1975). Нечеткие множества обеспечивают математическую формализацию экспертных оценок в виде

лингвистических переменных и функций принадлежности, а также предоставляют методы обработки этих оценок, имеющие простую лингвистическую интерпретацию (Shelestov and Kussul, 2008). При этом конечный пользователь оперирует объектами и понятиями естественного языка, которые автоматически преобразуются к числовому виду для компьютерной обработки. Такой подход обеспечивает способ приближенного описания поведения сложных и слабоструктурированных организационно-технических систем (Ярушкина и др., 2010) в условиях нестохастической неопределенности. Для формализации данных экспертного опроса на геопривязанной контурной карте Украины сформируем регулярную сетку (рис. 3) с размерами ячейки (а, в).

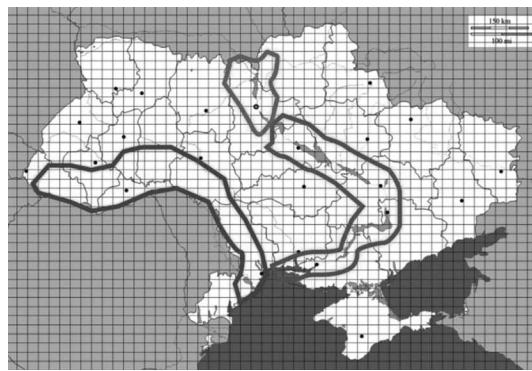


Рис. 3 Пример карты экспертного опроса с нанесенной сеткой

Размер ячейки A определяется допустимой погрешностью и масштабом карты. Каждая ячейка (точка в дискретном пространстве) $A(x_1, x_2)$ с координатами центра (x_1, x_2) характеризуется оценкой потребности, т.е. значением кластера $C(A)$, к которому эту точку отнес эксперт, и мерой достоверности такой оценки $\mu(C_A)$ – значением нечеткой функции принадлежности:

$$A_{(x_1, x_2)} = \{C(A), \mu(C_A)\} \quad (3)$$

Мера достоверности оценки $\mu(C_A)$ априорно для каждого эксперта принимается равной $\frac{1}{N}$, где N – число экспертов. Таким образом

$$A_{(x_1, x_2)} = \left\{ C(A), \frac{1}{N} \right\} \quad (4)$$

где N – число экспертов, $C(A)$ – экспертная оценка потребности, или номер кластера, который может принимать следующие значения (Таблица 1).

Таблица 1. Семантические значения экспертных оценок

Семантическое значение	Цвет	$C(A)$
очень высокая потребность	«красный»	3
высокая потребность	«синий»	2
средняя потребность	«зеленый»	1
не имеет потребности	-	0

Соответственно (4) определяются параметры функции принадлежности для каждой ячейки геопространственной анкеты (точки дискретного пространства) (рис. 4).

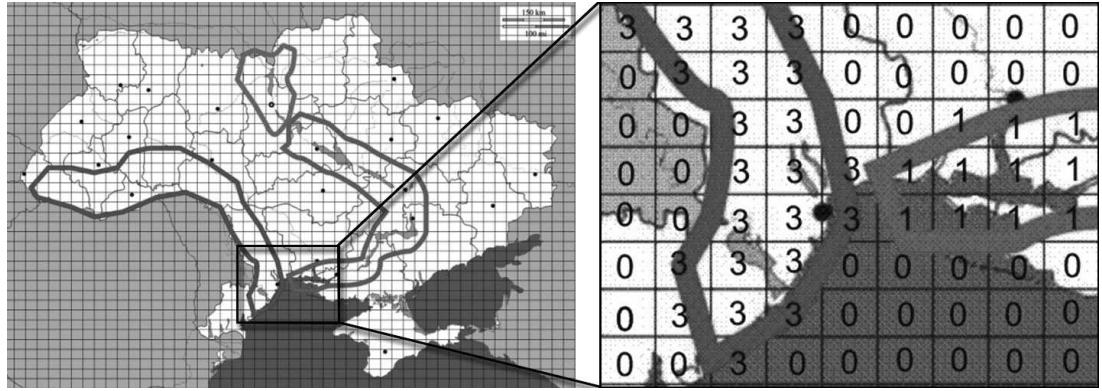


Рис. 4. Общая карта и ее фрагмент с результатами формализации экспертных оценок

Для крайних ячеек, находящихся на границе двух кластеров: C_i и C_j , если $S(C_i) > S(C_j)$, где $S(C_i)$ – площадь, которая принадлежит кластеру C_i , значение функции принадлежности определяется по формуле

$$A_{(x_1, x_2)} = \left\{ C_i, \frac{1}{2N} \right\} \quad (5)$$

Тогда для крайних ячеек на границе k кластеров

$$C(A_{(x_1, x_2)}) = \arg \max_{C_i} S(C_i), \quad \mu(A) = \frac{1}{kN}$$

То есть

$$A_{(x_1, x_2)} = \left\{ \arg \max_{C_i} S(C_i), \frac{1}{kN} \right\} \quad (6)$$

Интегральная «нечеткая» карта, или «тело потребностей» для одного ведомства формируется следующим образом:

$$\forall (x_1, x_2) \quad A^*_{(x_1, x_2)} = \{ C^*, \mu^* \}, \quad (7)$$

где

$$C^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i, \quad \mu^* = \sum_{i=1}^N \mu_i w_i, \quad (8)$$

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{если } C_i(A_{(x_1, x_2)}) = C^* \\ 0, & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (9)$$

Т.е., $w_i \neq 0$, если i -й эксперт отнес данную точку к классу C^* .

Таким образом, соотношения (7)-(9) обеспечивают этап формирования частных критериев в задаче многокритериальной оптимизации планирования космической съемки (1)-(2). Аналогично, по формулам (7)-(9) формируется интегральная трехмерная поверхность или

«тело потребностей» для каждого из заинтересованных ведомств и, в дальнейшем, для всех ведомств одновременно. Укажем, что соотношение (7) с определенными операциями получения интегральной оценки значения кластера и меры принадлежности, которые в данном случае описываются формулами (8)-(9), по сути является реализацией схемы компромиссов в процессе решения многокритериальной задачи оптимизации на основе геопространственного интеллекта для случая использования нечеткой экспертной информации. Таким образом, соотношения (7)-(9) обеспечивают не только этап формирования частных критериев, но и другие этапы решения задачи многокритериальной оптимизации, вплоть до определения схемы компромиссов и получения паретооптимального решения. Причем, формулы (7)-(9) описывают не единый способ формирования интегральной нечеткой экспертной оценки. Автором также исследовались и другие возможные варианты определения параметров интегральной нечеткой оценки, но данное исследование выходит за пределы тематики данной статьи.

Пример определения функции потребностей для МЧС

Проиллюстрируем предложенный метод на примере формирования функции потребностей по результатам экспернского опроса в МЧС. Для наглядности, возьмем результаты полученные после обработки анкетных данных за январь, март и сентябрь.

В соответствии с формулами (7)-(9) было сформировано трехмерное «тело потребностей» МЧС на каждый месяц года. На рис. 5 показаны значения функции потребностей для МЧС на январь, март и сентябрь), где в горизонтальной плоскости цветным градиентом показано интегральное значение функции потребности ведомства в получении информации ДЗЗ на определенном интервале времени для каждого района зоны интереса, а третья координата (по оси OZ) отображает меру достоверности такой оценки (значение функции принадлежности данному кластеру). Проецируя трехмерную поверхность на рис. 5 на горизонтальную плоскость OXY координат (x_1, x_2) , получим тематическую карту (рис. 6), где тремя цветами показаны области разной приоритетности.

Такие ежемесячные карты интегральных потребностей разных ведомств могут использоваться в системе поддержки принятия решений (СППР) при планировании космической съемки.

Формирование оптимального маршрута съемки

Получение интегральной оценки нужд разных ведомств разрешит более обоснованно планировать и проводить съемку наиболее актуальных районов, независимо от наличия заявок, в режиме т.н. «холостых проходов», которые имеют место в случае наличия свободного ресурса, при отсутствии заявок или их небольшому количеству на n-проход над определенной территорией.

Кроме того, это значительно упрощает задачу планирования для лица принимающего решение (ОПР), процесс оптимизации маршрутов при проведении съемок в режиме программных поворотов (РПП), когда съемка территориально разнесенных районов интереса проводится с отклонением оси визирования целевой аппаратур КА ДЗЗ от направления в nadir на угол $\pm 35^\circ$ (рис. 7).

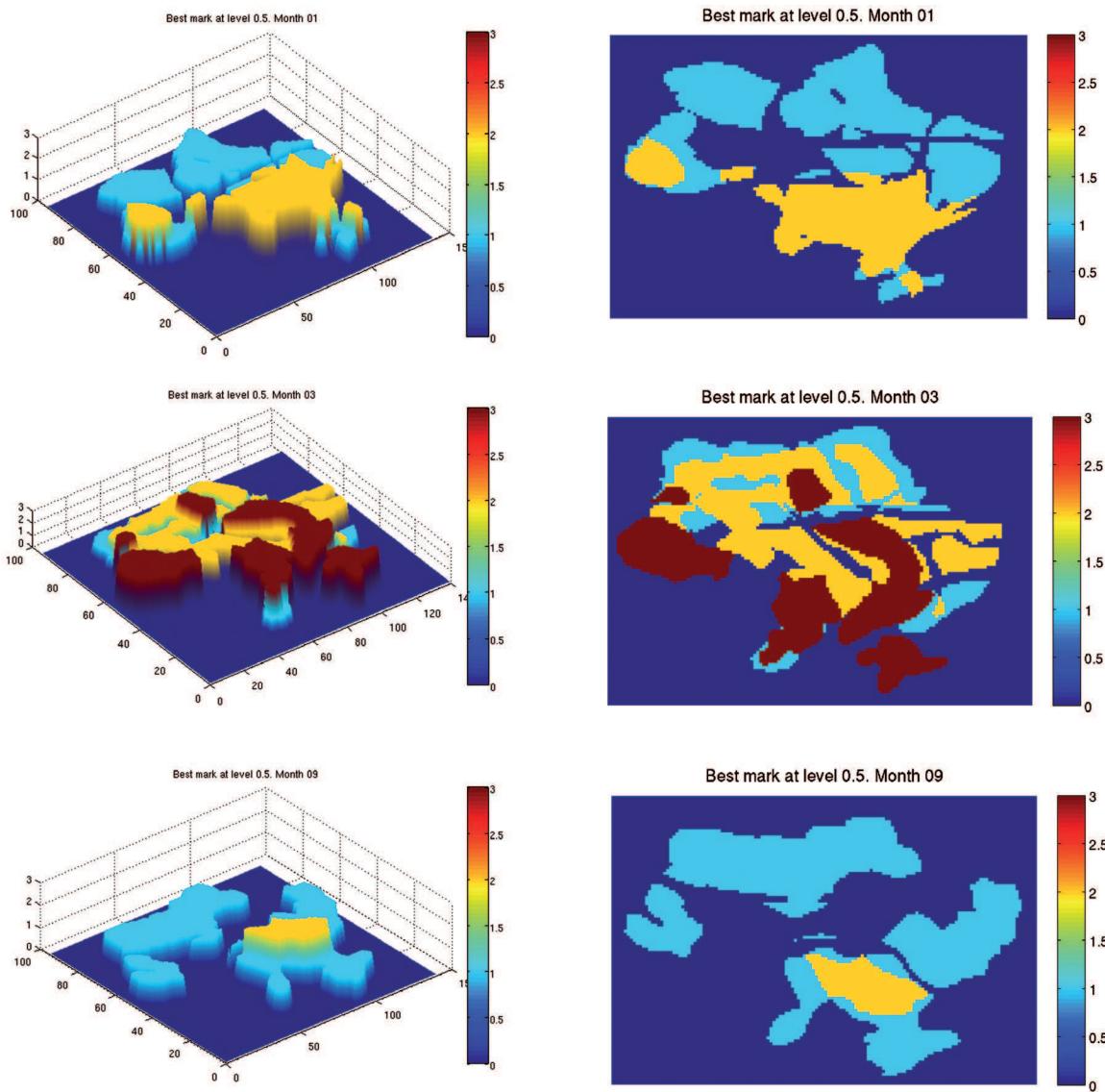


Рис. 5. Трехмерное «тело потребностей»
(январь, март, сентябрь)

Рис. 6. Двумерная карта потребностей (январь,
март, сентябрь)



Рис. 7. Использование интегральной карты потребностей ведомств в процессе
планирования космической съемки

Таким образом, нечеткая экспертная информация может быть формализована и использована в СППР как априорная основа для планирования съемок КА «Сич-2». При таком подходе ОПР получает определенную оценку потенциальной востребованности на оперативную и архивную информацию для каждого района главной зоны интереса (Украина и пограничные территории) и может ее использовать в автоматизированных системах планирования съемки.

Выводы

В работе сформулирована многокритериальная задача оптимизации планирования космической съемки для КА ДЗЗ «Сич-2» с учетом потребностей различных ведомств в получении информации для конкретного времени и региона.

Для формирования частных критерииов оптимизации предложено использовать методы экспертных оценок и геопространственного анализа. Формируемая на основе экспертных оценок интегральная трехмерная поверхность или «тело потребностей» для каждого ОИВ позволяет оптимизировать процесс планирования съемок по заданным районам интереса с максимально возможным учетом потребностей всех ОИВ.

Другие варианты определения параметров интегральной нечеткой оценки исследовались автором, однако такое исследование выходит за пределы тематики данной статьи и результаты будут опубликованы в других работах. Разработанный метод позволяет формализовать и учесть влияние большого количества особенностей и ограничений, которые имеют «нечеткую» природу, но в значительной степени влияют на процесс принятия решения во время планирования космической съемки.

Такой подход обеспечивает ОПР априорной базовой информацией по каждой точке главной зоны интереса на определенные периоды времени, что формализует процесс принятия решений и повышает эффективность использования полезной нагрузки КА ДЗЗ.

Подобный подход может использоваться в рамках организации СППР для ЛПР на всех этапах планирования, для КА ДЗЗ низкого, среднего и высокого разрешения.

Литература

1. Bacastow T.S., Bellafiore D.J. Redefining geospatial intelligence // American Intelligence Journal, 2009. P. 38-40.
2. Shelestov A.Yu., Kussul N.N. Using The Fuzzy-Ellipsoid Method For Robust Estimation Of The State Of A Grid System Node // Cybernetics and Systems Analysis, 2008. T.44. № 6. C. 847-854.
3. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // Information Sciences, 1975. Vol. 8. P. 301–357.
4. Воронин А. Н., Зиатдинов Ю. К., Харченко А.В. Сложные технические и эргатические системы: методы исследования. Харьков: Факт, 1997. 240 с.
5. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения. Киев: «Наукова думка», 2005.
6. Куссуль Н.М., Фриз В.П., Янчевський С.Л. Возможный подход к рациональному планированию космической съемки Земли на основе многокритериальной оптимизации // Житомир: ЖВІНАУ, 2011. №4. С. 97-105.
7. Лебедев А.А., Несторенко О.П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. Машиностроение, 1991. 224 с.

8. *Машков О.А., Фриз С.П.* Методика оптимизации планирования работы орбитальных средств космических систем наблюдения. Сборник научных работ. Житомир: ЖВИРЭ, 2003. С. 80-91.
9. *Пясковский Д.В.* Основы построения систем управления космическими аппаратами. Ч.1. Конспект лекций / Пясковский Д.В., Парфенюк В.Г.; - Житомир: ЖВИРЭ, 1998. 187 с.
10. *Самохвалов Ю.Я., Науменко Э.М.* Экспертное оценивание. Методический аспект. К.: ДУИКТ, 2007. 262 с.
11. *Скребушевский Б.С.* Формирование орбит космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
12. Тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Космическая система оптико-электронного наблюдения и связи «Сич-2» от 07.02.2002 г. // ДП «КБ «Южное». С. 7-8.
13. *Ханцеворов Ф.Р., Остроухов В.В.* Моделирование космических систем изучения естественных ресурсов Земли. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
14. *Янчевский С.Л.* Оптимизация планирования получения информации от систем дистанционного зондирования Земли среднего разрешения при условии финансовых ограничений // Научные работы ДонНТУ. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника». 2011.
15. *Янчевский С.Л.* Оптимизация использования информационного ресурса космических систем дистанционного зондирования Земле для нужд системы государственного управления // Материалы докладов Второй всеукраинской конференции Аэрокосмические наблюдения в интересах постоянного развития и безопасности GEO-UA 2010. Киев, «Освіта України», 2010. С. 166-168.
16. *Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г.* Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 320 с.

Optimization of decision making processes in the experts' systems of planning of special apparatuses of the Earth remote sensing satellites

N.N. Kussul ¹, S.L. Yanchevskiy ², A.N. Kravchenko ¹

*¹Space Research Institute NASU-NSAU
03680 Kyiv, 40 Glushkov Prospekt, build. 4/1*

E-mail: inform@ikd.kiev.ua;

*²Kyiv operational centre, National Space Agency of Ukraine
01010, Kyiv, Moskovska str., 8*

E-mail: jsl_m@mail.ru

An approach to optimal programming of satellite observations is presented. It is based on multiobjective optimization and geospatial intelligence methods. Each partial criterion to be optimized defines a demand for space images of particular ministry and is formed using geospatial analysis of fuzzy expert judgments. As a result of convolution of partial criteria we obtain 3d surface of generalized demand of every ministry, while 2d projection of this surface can be used to support decision making in programming of satellite observation.

Keywords: satellite programming, multiobjective optimization, fuzzy logic, geospatial intelligence.