

# Дискретные системы управления

УДК 681.51

С.Л. Янчевский

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Предложены новые подходы к решению задач планирования космической съемки на основе методов многокритериальной оптимизации и геопро странственного интеллекта. Степень удовлетворения потребностей конкретных ведомств в спутниковой информации определяется частными критериями, которые формируются по результатам экспертного опроса с использованием геопро странственного анализа нечеткой экспертной информации. Полученная в результате постобработки карта приоритетности в сочетании с объективными ограничениями оптимизирует планирование съемки КА ДЗЗ. Определение оптимального маршрута съемки с отклонением КА ДЗЗ от надира производится с помощью генетического алгоритма.

### Введение

В настоящее время есть все основания утверждать, что в странах-участницах СНГ, которые имеют собственную космическую отрасль для планирования съемки земной поверхности космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используются несколько устаревшие подходы. Большинство органов, принимающих решение (ОПР), ориентируются на КА прошлых поколений, которые имели невысокую производительность и использовались преимущественно для нужд оборонных ведомств и спецслужб как главных потребителей. Однако теперь все большую важность обретают задачи мониторинга аграрного сектора, чрезвычайных ситуаций, экологического контроля и т.д. Возросло количество потребителей данных ДЗЗ, каждый из которых в зависимости от ситуации может получать статус главного.

В 2011 г. намечены запуски белорусского КА ДЗЗ «БелКА-2», российского — «Канопус-Б» и украинского «Сич-2». Учитывая потребности этих стран, необходимо обеспечить наиболее рациональное использование возможностей этих спутников. Оптимизация использования целевой аппаратуры КА ДЗЗ, в том числе с режимом программных поворотов (РПП), позволит выполнить максимально возможное количество заявок потребителей из разных ведомств.

Интересы органов исполнительной власти (ОИВ) относительно данных ДЗЗ в определенные периоды времени могут не совпадать, что усиливает потребность в рациональном планировании работы целевой аппаратуры КА. Для решения этой задачи необходимо оценить заинтересованность каждого ОИВ в данных ДЗЗ на общий район интереса (территория Украины). Это позволит эффективно планировать съемку по имеющимся заявкам и работу целе-

вой аппаратуры при отсутствии заявок или наличии свободного ресурса КА ДЗЗ. В этой связи планирование предлагается проводить на основе данных экспертного опроса с учетом ограничений, обусловленных метеоусловиями, сезонностью природных явлений и особенностями полета КА ДЗЗ.

В данной работе формулируется задача многокритериальной оптимизации плана космической съемки для КА ДЗЗ высокого разрешения «Сич-2» с учетом потребностей различных ОИВ и имеющихся ограничений, а также задача выбора оптимального маршрута съемки.

### **1. Анализ существующих подходов к решению задачи планирования съемки**

Существующие алгоритмы перспективного и долгосрочного планирования достаточно полно рассмотрены в работе [1], отдельные подходы к планированию работы КА ДЗЗ описаны в [2], оригинальная методика планирования работы бортовой целевой аппаратуры (ЦА) предложена в [3–5]. Однако указанные работы не обеспечивают решения упомянутых выше проблем.

Для их комплексного решения целесообразно более гибко применить методы многокритериальной оптимизации [6] и системного анализа [7]. В работах [8, 9] 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 экспертного опроса. Причем эксперты должны определить не только время съемки, но и указать территорию, которая представляет наибольший интерес.

Соответственно в ходе экспертного опроса и обработки оценок возникает необходимость оценки геопространственной информации субъективного характера. Для решения такой задачи использовались методы геопространственного интеллекта [10]. Для формализации неопределенности субъективного характера использовался математический аппарат теории нечетких множеств [11], а для итогового определения оптимального маршрута съемки применялись генетические алгоритмы.

### **2. Постановка задачи многокритериальной оптимизации плана съемки**

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

Для этой территории формируется определенное количество заявок, которые должны быть выполнены почти в одно и то же время. Исходя из ТТХ КА «Сич-2» [12], имеется возможность проведения съемки с отклонением от надира  $\pm 35^\circ$ , что расширяет полосу захвата с 48,8 км до 1000 км ( $\pm 500$ ). Отсюда возникает задача составления плана съемок с отклонением КА от надира в интересах наиболее заинтересованных и наиболее важных пот-

ребителей. Множество решений определяется временами съемки и географическими координатами. Качество решения оценивается по совокупности частных критериев, определяющихся целевыми функциями потребностей конкретных ведомств-потребителей.

### 3. Метод решения задачи

Частными критериями качества оптимального планирования съемки являются степени удовлетворения потребностей в получении информации ДЗЗ на определенном интервале времени для каждого из ОИВ с учетом ограничений, которые накладываются ситуацией  $S$ . Ситуация в конкретный момент времени определяется следующими факторами (ограничениями): расчетной оптической видимостью районов съемки ( $E$ ); геометрической видимостью ( $K$ ); прогнозируемой (статистической) видимостью районов съемки ( $\gamma$ ). Факторы (ограничения) рассчитываются по классическим методикам, изложенным в [1–5]. Функции потребностей конкретных ведомств формируются на основе экспертного опроса. В роли экспертов выступают опытные специалисты ОИВ, четко понимающие потребности ОИВ в данных ДЗЗ. Они определяют время съемки и территорию, представляющую наибольший интерес. Для таких опросов неприменимы традиционные способы анкетирования [13], поэтому и возникла потребность учета геопространственной информации в экспертном оценивании и применении для ее обработки методов геопространственного интеллекта [10]. Разработана специальная анкета, позволяющая выделять области интереса.

Так была получена базовая информация для проведения планирования на весь год (по месяцам). Каждый район интереса выделялся контуром определенного цвета с определенными семантическими значениями, которые определяли степень потребности в данных ДЗЗ. Для формализации данных экспертного опроса на геопривязанной контурной карте Украины сформируем регулярную сетку с размерами ячейки ( $a$ ,  $b$ ). Каждая ячейка  $A_{(x_1, x_2)}$  с координатами центра  $(x_1, x_2)$  характеризуется оценкой потребности. Экспертная оценка потребности может принимать значения от 0 до 3. Так определяются параметры функции принадлежности для каждой ячейки геопространственной анкеты (точки дискретного пространства) (рис. 1).

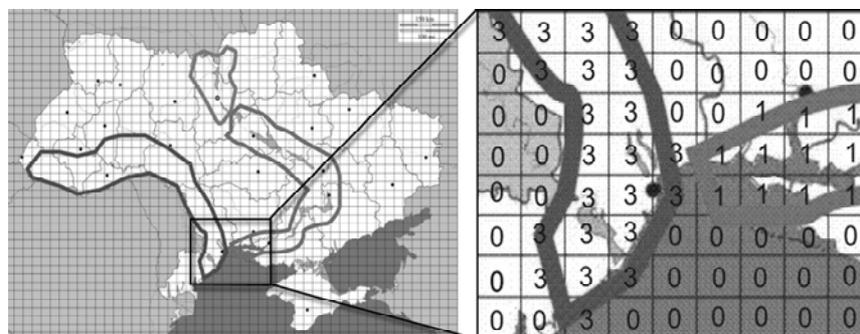
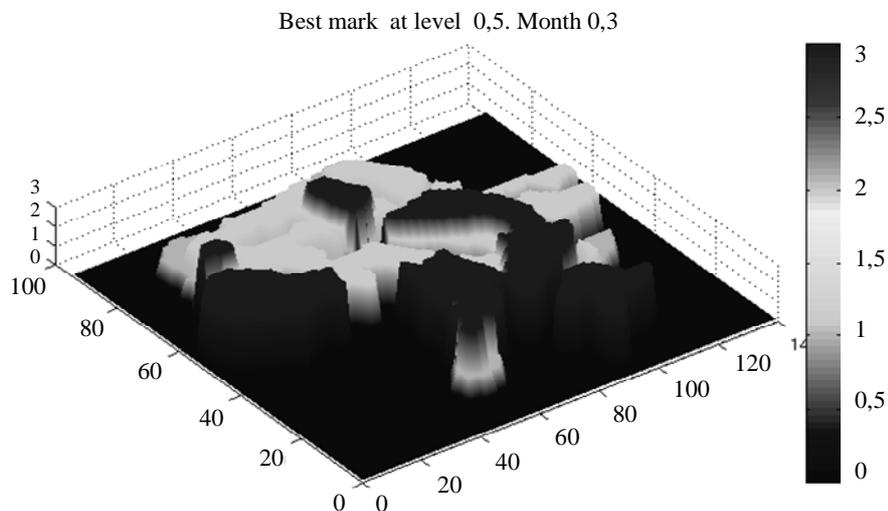


Рис. 1. Общая карта и ее фрагмент с результатами формализации экспертных оценок

По результатам постобработки совокупности экспертных оценок составляется интегральная «нечеткая» карта или трехмерное «тело потребностей» (рис. 2) и карта потребностей для одного ведомства (рис. 3).



Ри

с. 2. Трехмерное «тело потребностей» (на январь для МЧС)



Рис. 3. Карта потребностей в данных ДЗЗ (на январь для МЧС)

Подобный подход обеспечивают формирование частных критериев в задаче многокритериальной оптимизации планирования космической съемки, а также создание интегральной карты потребностей на каждый месяц года для каждого из заинтересованных ведомств и в дальнейшем для всех ведомств одновременно.

#### 4. Формирование оптимального маршрута съемки

Карты обобщенных потребностей ОИВ можно использовать в процессе планирования космической съемки. Получение интегральной оценки нужд разных ведомств позволит более обоснованно осуществлять планирование и проводить съемку наиболее актуальных районов, независимо от наличия заявок, в режиме так называемых «холостых проходов», которые имеют место при

наличии свободного ресурса, при отсутствии заявок или их небольшом количестве на  $n$ -проход над определенной территорией. Кроме того, это значительно упрощает задачу планирования для ОПР и процесс оптимизации маршрутов при проведении съемок в режиме программных поворотов.

В рамках дальнейшей оптимизации планирования на карту обобщенных потребностей ОИВ предлагается добавлять маски облачности (по данным метеоспутников) и маски статистической сезонной видимости районов съемки (рис. 4).

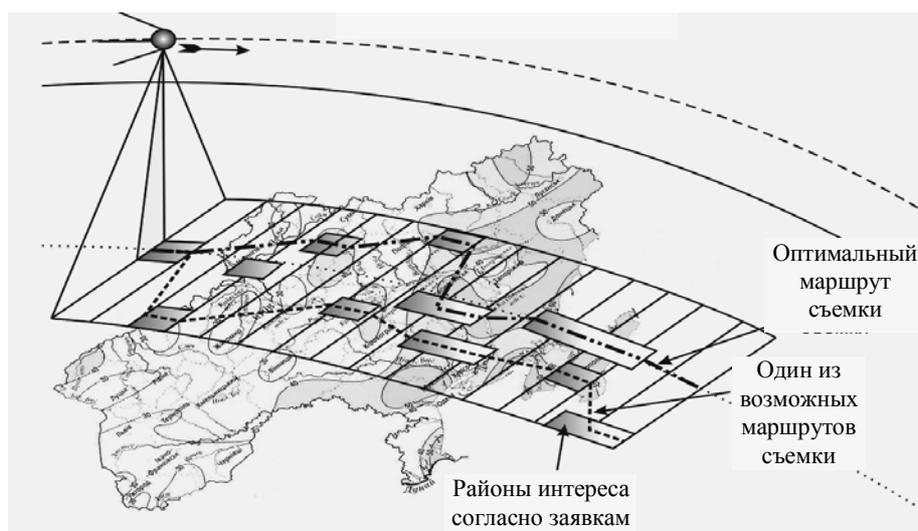


Рис. 4. Использование интегральной карты потребностей ведомств в процессе планирования космической съемки

При наложении на такую интегральную карту прогнозируемой трассы КА ДЗЗ полосы захвата аппаратуры бортового специального комплекса, шейп-файлов имеющихся заявок на съемку и указанных выше масок ограничений ЛПР при планировании съемок КА ДЗЗ получает полную картину относительно того, какие заявки попадают в полосу захвата и, следовательно, могут быть сняты за данный проход (или в течение суток); районы наибольшего совокупного интереса для нескольких потребителей одновременно, которые попадают в полосу захвата; возможность качественной съемки по каждой из заявок; возможность проведения съемок эвентуальных районов интереса при наличии свободного бортового ресурса; совокупность «конфликтующих» заявок от различных потребителей со схожим приоритетом.

Оптимизация маршрута съемки выполняется с использованием интеллектуальных вычислений [14] с учетом возможности отклонения КА ДЗЗ от надира на угол  $\pm 35^\circ$  в режиме программных поворотов.

##### 5. Генетический алгоритм оптимизации маршрута съемки

Поскольку поверхность в пространстве параметров, на которой осуществляется оптимизация, не обладает свойством гладкости, и какая-либо дополнительная информация о ее форме отсутствует, для оптимизации математической модели нельзя воспользоваться традиционными методами

оптимизации. В такой ситуации целесообразно применить один из методов эволюционных вычислений [15], методология которых базируется на моделировании основных механизмов развития биологических видов, связанных с естественным отбором и генетическим наследованием [16]. Среди моделей выделяют три основные парадигмы: генетические алгоритмы, эволюционные стратегии и эволюционное программирование [17]. Для рассматриваемой постановки задачи целесообразно использовать генетический алгоритм, который представляет собой метод поиска, оперирующий в каждый момент времени не одним приближением, а набором (популяцией) приближений. Каждое из приближений представляет собой бинарную строку, кодирующую неизвестную величину. В процессе выполнения генетического алгоритма (ГА) на основе моделирования механизмов биологической эволюции итеративно формируется последовательность популяций, элементы (особи) которых на каждой следующей итерации удовлетворяют критерию качества не хуже своих предшественников.

К основным операциям ГА относятся скрещивание, мутации и естественный отбор. Формализация этих операций многократно описана в литературе (например, [16, 17]) и не зависит от решаемой задачи. Предметная область решаемой задачи определяет способ формирования бинарных строк кода неизвестного вектора и вид критерия качества, применяемого для отбора лучших представителей популяции. Таким образом, для рассматриваемой задачи формирования маршрута съемки необходимо определить способ кодирования вектора параметров маршрута и критерий качества.

ГА оптимизации маршрута требует выполнения следующих действий [17].

1. Инициализировать популяцию, т.е. задать набор начальных приближений вектора  $S$ . Учитывая достаточно высокую сложность решаемой задачи, размер популяции  $\mu$  целесообразно выбрать достаточно большим, например, равным 100.

2. Выполнить рекомбинацию (скрещивание) с использованием  $\mu$  родительских особей для получения  $\lambda$  потомков. Как принято в эволюционных вычислениях, число потомков  $\lambda$  должно в 5–7 раз превышать количество родительских особей.

3. Выполнить мутацию (случайное зашумление) для каждого из  $\lambda$  потомков.

4. Оценить  $\lambda$  или  $\mu + \lambda$  представителей популяции согласно выбранному критерию.

5. Выбрать  $\mu$  лучших представителей для формирования новой популяции.

6. Если требуемая точность оценивания не достигнута, перейти к шагу 2, в противном случае завершить алгоритм.

Для эффективной реализации этого алгоритма необходимо использовать инфраструктуру высокопроизводительных вычислений, описанную в [18–20].

## **6. Результаты моделирования**

Предложенная методология построения маршрута съемки реализована в виде программного обеспечения на язык PYTHON с учетом реальных техни-

ческих характеристик и параметров орбиты спутника ДЗЗ. На основе текущего положения спутника, параметров его орбиты и приоритетности съемки, вычисленной согласно методу, описанному в разд. 3 и в работе [21], программа строит множество возможных маршрутов съемки, которое может использоваться в системе поддержки принятия решений при оперативном планировании спутниковой съемки. Пример множества возможных маршрутов съемки с учетом потребностей ведомств (результатов обработки нечеткой геопространственной экспертной информации) представлен на рис. 5.

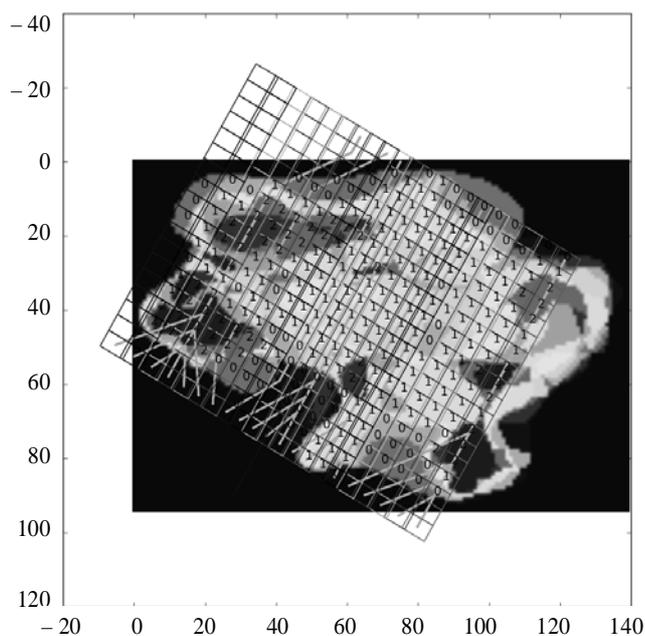


Рис. 5. Множество возможных маршрутов съемки для системы поддержки принятия решений

### Выводы

В настоящей 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. Формируемая на основе экспертных оценок интегральная карта потребностей позволяет оптимизировать процесс планирования съемок по заданным районам интереса с максимально возможным учетом потребностей всех ОИВ, а генетические алгоритмы на базе обработанных данных экспертного опроса и объективных ограничений дают возможность отбора оптимального маршрута съемки.

Такой подход обеспечивает ОПР априорной базовой информацией по каждой точке главной зоны интереса и определенным периодам времени, что оптимизирует процесс планирования и повышает эффективность работы КА ДЗЗ.

1. Пясковский Д.В., Парфенюк В.Г. Основы построения систем управления космическими аппаратами. Ч.1. Конспект лекций. — Житомир: ЖВИРЭ, 1998. — 187 с.
2. Лебедев А.А., Несторенко О.П. Космические системы наблюдения. Синтез и модели-

- рование. — М.: Машиностроение, 1991. — 224 с.
3. *Скребушевский Б.С.* Формирование орбит космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.
  4. *Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В.* Моделирование космических систем изучения естественных ресурсов Земли. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
  5. *Машков О.А., Фриз С.П.* Методика оптимизации планирования работы орбитальных средств космических систем наблюдения // Сб. науч. работ. — Житомир: ЖВИРЭ, 2003. — С. 80–91.
  6. *Воронин А.Н., Зиатдинов Ю.К., Харченко А.В.* Сложные технические и эргатические системы: методы исследования. — Харьков: Факт, 1997. — 240 с.
  7. *Згуровский М.З., Панкратова Н.Д.* Системный анализ. Проблемы, методология, приложения. — Киев: Научн. мысль, 2005. — 189 с.
  8. *Куссуль Н.Н., Фриз В.П., Янчевский С.Л.* Возможный подход к рациональному планированию космической съемки Земли на основе многокритериальной оптимизации // Проблемы створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. — 2011. — № 4. — С. 97–105.
  9. *Янчевский С.Л.* Оптимизация использования информационного ресурса космических систем дистанционного зондирования Земли для нужд системы государственного управления // Материалы докл. Второй всеукр. конф. «Аэрокосмические наблюдения в интересах постоянного развития и безопасности GEO-UA 2010». — Киев: Освіта України, 2010. — С. 166–168.
  10. *Bacastow T.S., Bellafigore D.J.* Redefining geospatial intelligence // American Intell. J. — 2009. — P. 38–40.
  11. *Zadeh L.A.*, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // Inform. Sci., 1975. — **8**. — P. 199–249; 301–357.
  12. *Тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Космическая система оптико-электронного наблюдения и связи «Сич-2» от 07.02.2002 г. (КБ «Южное»).* — 2002. — С. 7, 8.
  13. *Самохвалов Ю.Я., Науменко Э.М.* Экспертное оценивание. Методический аспект. — К.: ДУИКТ, 2007. — 262 с.
  14. *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. — **44**, N 6. — P. 847–854.
  15. *Fogel D.B.* Evolutionary computation: toward a new philosophy of machine intelligence // New York: IEEE Press, 1995. — 272 p.
  16. *Назаров А.В., Лоскутов А.И.* Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. — Санкт-Петербург: Наука и техника, 2003. — 384 с.
  17. *Eberhart R., Simpson P., Dobbins R.* Computational Intelligence PC Tools. — New York: AP Professional, 1996. — 464 p.
  18. The Data Fusion Grid Infrastructure: Project Objectives and Achievements / *L. Hluchy, N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, O. Kravchenko, Y. Gripich, P. Kopp, E. Lupian* // Comput. and Inform. — 2010. — **29**, N 2. — P. 319–334.
  19. *Kussul N., Shelestov A., Skakun S.* Grid System for Flood Extent Extraction from Satellite Images // Earth Sci. Inform. — 2008. — 1(3–4). — P. 105–117.
  20. *Шелестов А.Ю., Куссуль Н.Н., Скакун С.В.* Grid-технологии в системах мониторинга на основе спутниковых данных // Проблемы управления и информатики. — 2006. — № 1–2. — С. 259–270.
  21. *Янчевский С.Л.* Многокритериальная оптимизация планирования космической съемки на основе геопространственной экспертной информации // Вісн. НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. праць. — 2011. — № 53. — С. 96–105.