

Н.Ф. Аверкиев, доктор технических наук,  
профессор  
С.А. Богачев, кандидат технических наук  
И.Ю. Гуляев

## **Оптимизация последовательности ввода в эксплуатацию квантово-оптических систем для юстирования радиотехнических средств**

*Статья посвящена описанию постановки и решения задачи оптимизации последовательности ввода в эксплуатацию квантово-оптических систем для юстирования радиотехнических средств космического назначения с использованием принципа Беллмана.*

Юстирование радиотехнических средств (РТС) космического назначения заключается в проверке и наладке приборов и механизмов для установления правильного взаимодействия и расположения деталей и узлов, поддержания точностных характеристик средства в допустимых пределах и проводится на нескольких стадиях жизненного цикла. Суть данных работ заключается в сравнении результатов траекторных измерений юстируемых РТС с результатами измерений, полученных с помощью РТС более высокой точности (с так называемой «эталонной траекторией»). Для юстирования, как правило, используются специальные юстировочные космические аппараты (КА). При отсутствии на орбите требуемого количества таких КА возникает проблема юстирования РТС на этапах создания, испытаний и эксплуатации.

Для снижения материальных затрат на запуск специальных юстировочных КА в настоящее время предполагается использование в этом качестве многофункциональных КА, выполняющих не только свою основную задачу, но и выступающих в роли космических объектов, позволяющих получать эталонную траекторию требуемой точности [1]. Для получения такой траектории могут использоваться и квантово-оптические системы (КОС). В тех случаях, когда КА оснащены уголковыми отражателями, прецизионные измерения дальности выполняются с точностью 0,2-2 см [2].

Использование КОС в качестве основных средств получения эталонной траектории в настоящее время затруднено из-за двух существенных недостатков: слабой развитости сети КОС и значительных астро-климатических ограничений на их применение (облачность, туман, пыль и т.п.).

Первый недостаток может быть устранен созданием в течение ближайших лет квантово-оптического измерительного комплекса (КОИК) на базе новых малогабаритных образцов КОС сравнительно невысокой стоимости. Предполагается, что КОИК будет состоять из 20-30 отдельных средств различной ведомственной принадлежности, имеющих общую базу измерительной информации<sup>1</sup>. Аналогичный комплекс сейчас существует в виде Международной службы лазерно-дальномерных пунктов. Отдельные средства Министерства обороны РФ предполагается размещать на действующих отдельных командно-измерительных комплексах и отдельных измерительных пунктах Войск воздушно-космической обороны, так как в этом случае будет решена проблема передачи полученной измерительной информации в пункт сбора и обработки информации КОС.

Второй недостаток может быть компенсирован выбором географического расположения КОС.

1 Официальный сайт ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» // <http://nprk-spp.ru>.

Развертывание КОИК занимает значительный промежуток времени. Ввод в эксплуатацию отдельного КОСа повышает вероятность применения КОИК в целом для юстирования РТС, но значения увеличения вероятности для каждого КОС в отдельности могут существенно различаться, так как зависят от вероятности благоприятных условий проведения измерений и количества возможных сеансов измерений. Так, по данным метеослужбы Главного испытательного космического центра (ГИКЦ) имени Г.С. Титова, вероятность благоприятных условий проведения измерений для мест возможного размещения КОС находится в диапазоне от 0,22 до 0,66.

Учитывая большое количество возможных вариантов промежуточного построения КОИК в этих состояниях (из-за большого количества КОС и мест возможного их расположения) задача оптимизации последовательности ввода в эксплуатацию КОС является актуальной.

Будем полагать, что необходимо найти оптимальную последовательность ввода  $N$  однотипных КОС.

Вариант промежуточного построения КОИК, включающий ровно  $r$  КОС, расположенных в  $r$  местах из  $N$  возможных, назовем состоянием КОИК  $S_r$ . Математически состояние  $S_r$  представляет собой подмножество из  $r$  элементов множества, содержащего  $N$  элементов, и называется сочетанием. Число сочетаний из  $N$  по  $r$  равно

$$C_N^r = \frac{N!}{r!(N-r)!}.$$

Если конкретное КОС именовать его номером (в пределах  $N$ ), то, например, все варианты развертывания 2-х КОС из 4-х возможных можно представить шестью состояниями  $S_2$  (множествами): {1,2}, {1,3}, {1,4}, {2,3}, {2,4}, {3,4}. На рисунке 1 показаны все возможные состояния системы из 4-х элементов при ее развертывании.

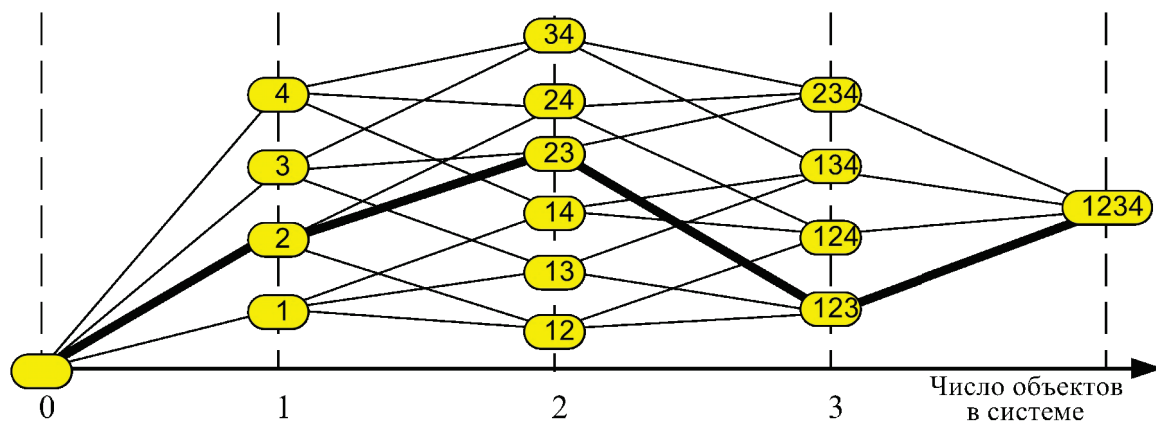


Рисунок 1 – Варианты развертывания системы из четырех элементов

В каждом состоянии КОИК будет функционировать с определенной результативностью. Последовательность перехода в это состояние не будет влиять на текущее функционирование. Учитывая множественность вариантов перехода в текущее состояние, суммарная результативность за все время развертывания в это состояние, в общем случае, тоже будет различна. Например, в состоянии {1,2} результативность функционирования составляет 0,9, в состояниях {1} – 0,5, {2} – 0,7. Тогда

суммарная результативность за все время функционирования при развертывании, включая состояние {1,2}, составит 1,4 при развертывании сначала 1-го КОС, а затем 2-го или 1,6 при развертывании КОС в обратной последовательности.

Последовательность развертывания  $r$  КОС из  $N$  возможных в полной КОИК как упорядоченный набор  $r$  элементов множества, содержащего  $N$  элементов, называется размещением [4]. Число размещений из  $N$  по  $r$  равно

$$A_n^r = \frac{N!}{(N-r)!}$$

Например, все последовательности развертывания двух КОС из четырех возможных можно представить двенадцатью вариантами: [1,2], [1,3], [1,4], [2,1], [2,3], [2,4], [3,1], [3,2], [3,4], [4,1], [4,2], [4,3]. На рисунке 1 последовательности развертывания системы показаны линиями (возможная оптимальная последова-

тельность выделена утолщенной линией). Полное число вариантов развертывания системы из N элементов составит (число перестановок) [4]

$$P_N = N!$$

Все 6 последовательностей развертывания системы из 3-х элементов, в качестве примера, показаны на рисунке 2.

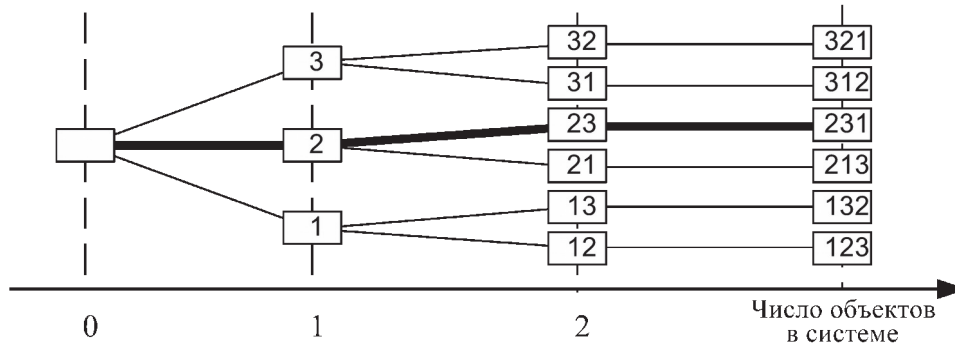


Рисунок 2 – Последовательности развертывания системы из трех элементов

Исходную задачу поиска оптимального варианта развертывания N КОС можно решать методом полного перебора всех вариантов. Для реальных данных (N=20 – 30) полное число вариантов перебора велико. Так 20 КОС можно развернуть  $2,43 \cdot 10^{18}$ , а 30 КОС –  $2,65 \cdot 10^{32}$  вариантами. Решение задачи полным перебором в подобных условиях крайне затруднительно.

Оптимальная последовательность ввода в эксплуатацию КОС может быть найдена,

например, с помощью метода динамического программирования на основе принципа Беллмана: на каждом шаге оптимизируется управление только этого шага, при этом управление на каждом шаге должно быть оптимальным с точки зрения процесса в целом [5]. Для поиска оптимальных решений могут использоваться также и другие методы оптимизации [6, 7].

Расчетную схему метода динамического программирования для данной задачи можно проиллюстрировать рисунком 3.

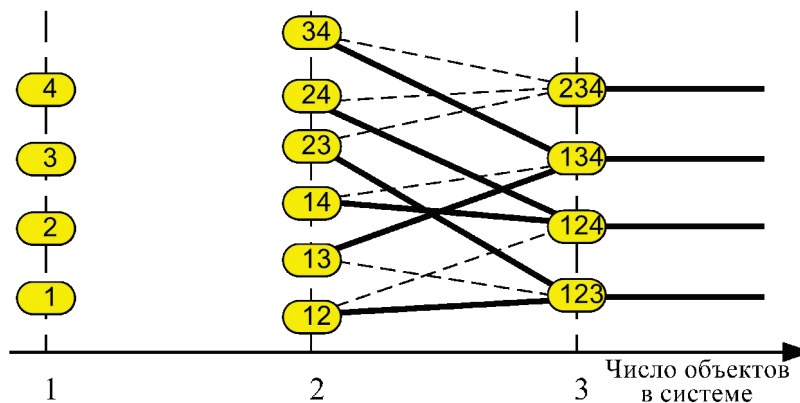


Рисунок 3 – Этап расчета системы из 4-х элементов

Предположим, что рассчитаны условно оптимальные (при условии если система попадет в это состояние) последовательности перевода системы из всех состояний  $S_r$  (развернуто  $r$  из  $N$  элементов) в конечное. Для каждой последовательности определена результативность перехода из текущего в конечное состояние. На рисунке 3 эти оптимальные последовательности из  $S_3$  показаны сплошными линиями.

На следующем шаге последовательно для каждого из  $S_{r-1}$  состояний рассчитывается результативность функционирования в этом состоянии, формируются все варианты перевода системы в  $S_r$  состояние и из сопоставления этих вариантов определяется условно-оптимальная последовательность перевода из перебираемого  $S_{r-1}$  состояния в конечное. В примере рисунка 3 для каждого из двух рассчитываемых вариантов для  $S_2$  остается только лучший (сплошная линия), остальные (пунктирная линия) в дальнейшем не рассматриваются.

В итоге, условно оптимальные последовательности получаются рассчитанными уже для всех состояний  $S_{r-1}$ .

Повторяя шаги из конечного в начальное состояние, находится оптимальная (безусловно) последовательность перевода системы из начального в конечное состояние.

Неучет на последующих шагах заведомо неоптимальных последовательностей позволяет существенно сократить число перебираемых вариантов.

В такой схеме расчета необходимо определять результативность функционирования во всех возможных состояниях системы. Их число равно  $2^N - 1$  (начальное состояние с нулевой результативностью не включено). Для 20 КОС число всех состояний немногим более 1 миллиона, а для 30 КОС – 1 миллиарда.

С учетом рассчитываемых вариантов перехода из одного состояния в соседние необходимо провести комбинацию расчетов

для  $1,05 \cdot 10^7$  вариантов перехода для 20 КОС и для  $1,61 \cdot 10^{10}$  вариантов перехода для 30 КОС, что существенно меньше числа вариантов полного перебора.

Рассмотренная схема не предполагает обязательности постоянного темпа ввода КОС в систему. Возможность ввода на каком-то этапе сразу нескольких КОС только уменьшит число рассчитываемых вариантов. Уменьшение числа вариантов будет определяться и некоторыми заранее предопределенными переходами. То есть учет ряда реальных особенностей, ограничений в данной схеме возможен и приводит к упрощению задачи.

Выше рассматривалась задача, в которой конечное состояние было задано. Но количество возможных мест размещения КОС может быть и больше количества развертываемых КОС в КОИК. Тогда необходимо предварительно решить задачу оптимального расположения (не последовательности развертывания)  $N$  КОС из  $M$  возможных мест (например, при 40 возможных местах 30 КОС можно разместить примерно  $10^9$  вариантами). Это задача другого математического класса.

В вышерасположенном материале неявный расчет результативности функционирования КОИК в каждом состоянии не детализировался и рассматривался в качестве «элементарной» операции.

В проводимых расчетах в качестве показателя результативности была взята средняя арифметическая возможности юстирования РТС на заданном промежутке витков при различном числе и расположении КОС [3].

Данный показатель определяет возможности выполнения целевой задачи при заданном числе и расположении КОС и вычисляется на основании выбранной схемы сбора измерений, вероятности благоприятных условий проведения измерений, минимального числа измерений и необходимого количества витков для прогнозирования движения юстировочного КА. Так, при вводе в эксплуатацию трех новых КОС (с учетом трех КОС, имеющих в составе наземного автоматизирован-

ного комплекса управления ГИКЦ) величина средней арифметической возможности юстирования для одновитковой схемы сбора измерений принимает значения от 0,088 до 0,238.

Результаты расчетов при решении задачи ввода в эксплуатацию квантово-оптических систем для юстирования радиотехнических средств показали практическую реализуемость предложенных подходов.

#### Список использованных источников

1. Богачев С.А., Ткачев Е.А., Фатеев В.Ф. Применение малого космического аппарата с бортовой навигационной аппаратурой ГЛОНАСС/GPS для юстировки наземных средств траекторных измерений // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47 – № 3. – С. 64-68.
2. Белов М.С., Васильев М.Л., Гашкин Е.С., Пархоменко Н.Н., Шаргородский В.Д. Сферическая линза как спутник-цель для прецизионной лазерной дальнометрии // Электромеханические волны и электромагнитные поля. – 2007. – Т. 12. – № 7. – С.11-14.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов – 13-е издание, исправленное. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
5. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. – М.: Наука, 1971. – 396 с.
6. Аверкиев Н.Ф., Салов В.В., Жаткин А.Т., Киселев В.В. Модификация баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов на основе принципа оптимального управления // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57 – № 7. – С. 23-25.
7. Аверкиев Н.Ф. Синтез оптимального управления движением динамической системы // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2001. – Т. 44 – №8. – С. 21-25.