

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Максимов Н.А. \*, Склеймин Ю.Б. \*\*, Шаронов А.В. \*

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\* e-mail: k308@mai.ru*

*\*\* e-mail: skleymin@yandex.ru*

---

Построена концептуальная модель сложной системы мониторинга, использующей комплекс БЛА в совокупности с системами управления, обработки и доставки информации. Разработана имитационная модель, позволяющая решать задачи оценки эффективности системы мониторинга на этапе проектирования, а также при выборе стратегий наблюдения (съёмки) при ее использовании. Проведено тестирование разработанной модели на ряде гипотетических примеров в широком диапазоне исходных данных, показавшее ее работоспособность и непротиворечивость.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, имитационная модель, система передачи данных, оценка эффективности, проектирование, тестирование.

---

### Введение

В настоящее время ширится использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в самых разнообразных системах, решающих задачи слежения за состоянием газопроводов, лесов, посевов, шельфа, применяемых при ликвидации техногенных катастроф и чрезвычайных ситуаций, а также в военной сфере [1, 2]. Наибольший эффект может быть получен, если создана определенная инфраструктура, включающая в свой состав группу беспилотных летательных аппаратов, мобильные средства управления, систему приема и передачи команд и информации, средств обработки данных. Ранее у нас в стране практиковались одиночные вылеты БЛА, переход от них к высокоорганизованным комплексам БЛА предполагает использование более сложных обеспечивающих и управляющих комплексов. Их создание невозможно без предварительного анализа и моделирования процессов информационного взаимодействия отдельных систем, входящих в состав таких комплексов.

### Цели моделирования и построение концептуальной модели системы

*Объектом моделирования* являются информационные процессы, происходящие в системе: получение данных мониторинга, их передача через кана-

лообразующие средства и обработка на различных объектах, распределённых по тракту передачи.

#### *Цели моделирования:*

- выявление удачных стратегий организации и функционирования системы;
- оперативная проверка на выполнимость планов мониторинга, обработки и связи в условиях случайных помех и отказов оборудования (или поражающих воздействий для военных приложений);
- исследование возможности использования модели как инструмента наблюдения за состоянием в системе при использовании реальных данных;
- исследование возможности оперативного перепланирования при существенном и неожиданном изменении условий функционирования системы.

Статистика, полученная в результате имитационного моделирования, позволит оценить различные подходы к организации и стратегии функционирования системы и получить отправную точку для более детальной, а значит, и трудоёмкой оптимизации, сократив множество вариантов при поиске оптимального решения.

*Пользователями* имитационной модели являются разработчики обеспечения информационного взаимодействия в системе. Разработанная модель может быть использована также при распределении задач между БЛА разных стартовых групп.

На наиболее низком уровне детализации концептуальная модель информационного взаимодействия системы представлена на рис. 1.

Концептуальная модель рассматривает *потребителей* системы мониторинга в виде источников заявок (запросов) на съёмку и приёмников ответных данных на запросы. На рис. 1 обозначены четыре потребителя, связанные с программно-техническим комплексом (ПТК) через среду передачи данных (СПД), и два потребителя данных мониторинга для оперативного обслуживания важных объектов контроля (ВОК). Этот тип потребителей информационно связан через среду передачи данных с ПТК и непосредственно с пунктом наземной обработки (ПНО), пунктом наземного управления (ПНУ). Типовой потребитель на первом этапе рассмотрения может быть описан как генератор заявок на съёмку двух типов.

Поток заявок складывается из четырёх составляющих:

$$\Pi = \Pi_{1a} + \Pi_{1b} + \Pi_{2a} + \Pi_{2b},$$

где  $\Pi_{1a} = \Pi_{1a}(\lambda_1)$  — поток срочных заявок с интенсивностью  $\lambda_1$ ;

$\Pi_{2a} = \Pi_{2a}(\lambda_2)$  — поток внесрочных заявок с интенсивностью  $\lambda_2$ ;

$\Pi_{1b}(p_1)$  — поток заявок на уточнение срочных заявок в результате неудовлетворительного их исполнения с вероятностью  $p_1$ ;

$\Pi_{2b}(p_2)$  — поток заявок на уточнение срочных заявок в результате неудовлетворительного их исполнения с вероятностью  $p_2$ .

В первом приближении все потоки заявок могут быть приняты пуассоновскими. Интервал времени  $T$  между двумя соседними событиями простейшего потока имеет показательное распределение

$$p(\lambda) = \exp\{-\lambda t\},$$

где  $\lambda$  — величина, обратная среднему значению интервала  $T$ .

Потоки заявок на уточнение зависят от вероятности неудовлетворительного исполнения заявки, что, в свою очередь, зависит от всей совокупности параметров звеньев передачи и преобразования как заявки, так и результатов мониторинга, ей соответствующих.

Входящий поток в объект типа «потребитель» является потоком документов, подготовленных как результатов обработки заявок. Будем называть их формулярами. Заявки на мониторинг (съёмку) обладают некоторым временем жизни, т.е. на них накладывается требование получить ответ не позднее определённого срока. Важной характеристикой качества функционирования системы является доля успешно обработанных заявок, т.е. оценка вероятности обработки заявок к заданному сроку.

Среда передачи данных выступает как некоторый объект, переправляющий с определенной производительностью заявки и ответы на них. В общем случае СПД характеризуется уровнем пропускной способности и рядом других параметров, влияющих на неё. СПД имеет входной поток помех, которые генерируются источниками помех (ИП). ИП характеризуется уровнем помех и интенсивностью потока помех двух видов: ухудшающих связь и прерывающих её.

Программно-технический комплекс представляет собой объект, распределяющий по некоторому алгоритму заявки от потребителя на ПНО и ПНУ различных стартовых групп. В ПТК приходят обработанные данные съёмки с ПНО стартовых групп и обрабатываются с некоторой производительностью. На ПТК воздействуют помехи, он также подвергается поражающим воздействиям, генерируемым источником поражающих воздействий (ИПВ). Характеристиками ИПВ являются интенсивности двух пуассоновских потоков поражающих воздействий: временно выводящих из строя и поражающих без восстановления.

ПНО и ПНУ представляют собой объект, получающий заявки от ПТК и направляющий их на соответствующий БЛА. Во время съёмки с БЛА, которая занимает некоторое время, на ПНУ и ПНО идёт с некоторой производительностью обработка получаемого с борта БЛА потока данных съёмки и пересылка результатов этой обработки на ПТК.

БЛА представляет собой объект, осуществляющий съёмку местности с некоторой производительностью, согласно заявкам, получаемым с ПНУ.

Рассматриваемая система, таким образом, может быть представлена как система массового обслуживания.

Функционирование системы мониторинга заключается в формировании и выполнении трех планов: наблюдения (съёмки), обработки и связи. По совокупности срочных и внесрочных заявок, с учётом возможностей обработки, связи, расположения и состояния БЛА, строится план съёмки, т.е. определяется, какой БЛА что выполняет во времени. Планы связи и обработки являются обеспечиваю-

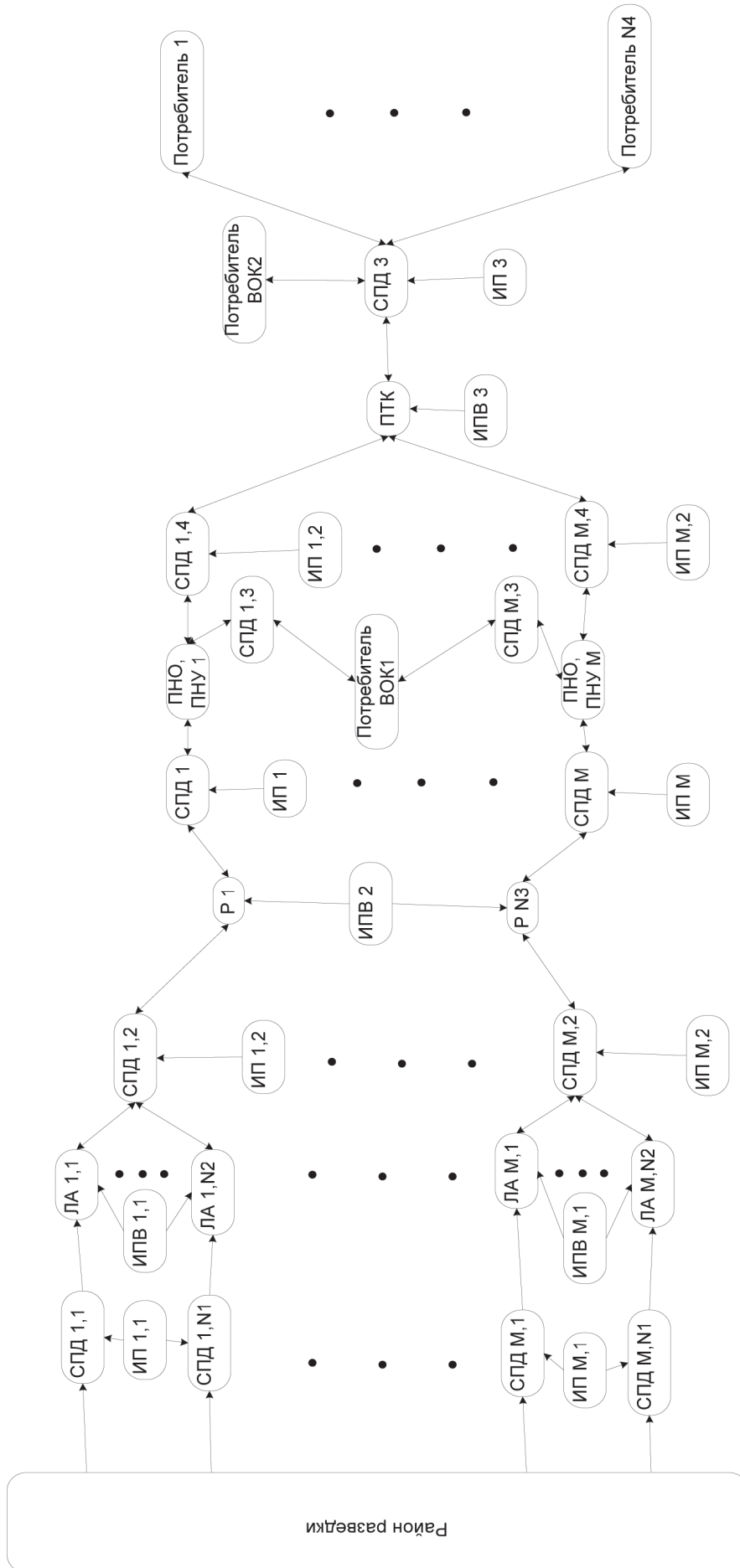


Рис. 1. Концептуальная модель информационного взаимодействия верхнего уровня

щими и строятся в зависимости от плана наблюдения. План связи содержит в себе информацию о том, в какое время какие данные передаются. На этой основе определяется, какие каналообразующие средства будут задействованы. План обработки содержит в себе информацию о распределении меж-

ду устройствами и автоматизированными рабочими местами этапов обработки данных, получаемых с БЛА [3].

Предлагаемое упрощённое представление системы мониторинга на примере комплекса БЛА показано на рис. 2. В предлагаемой модели БЛА

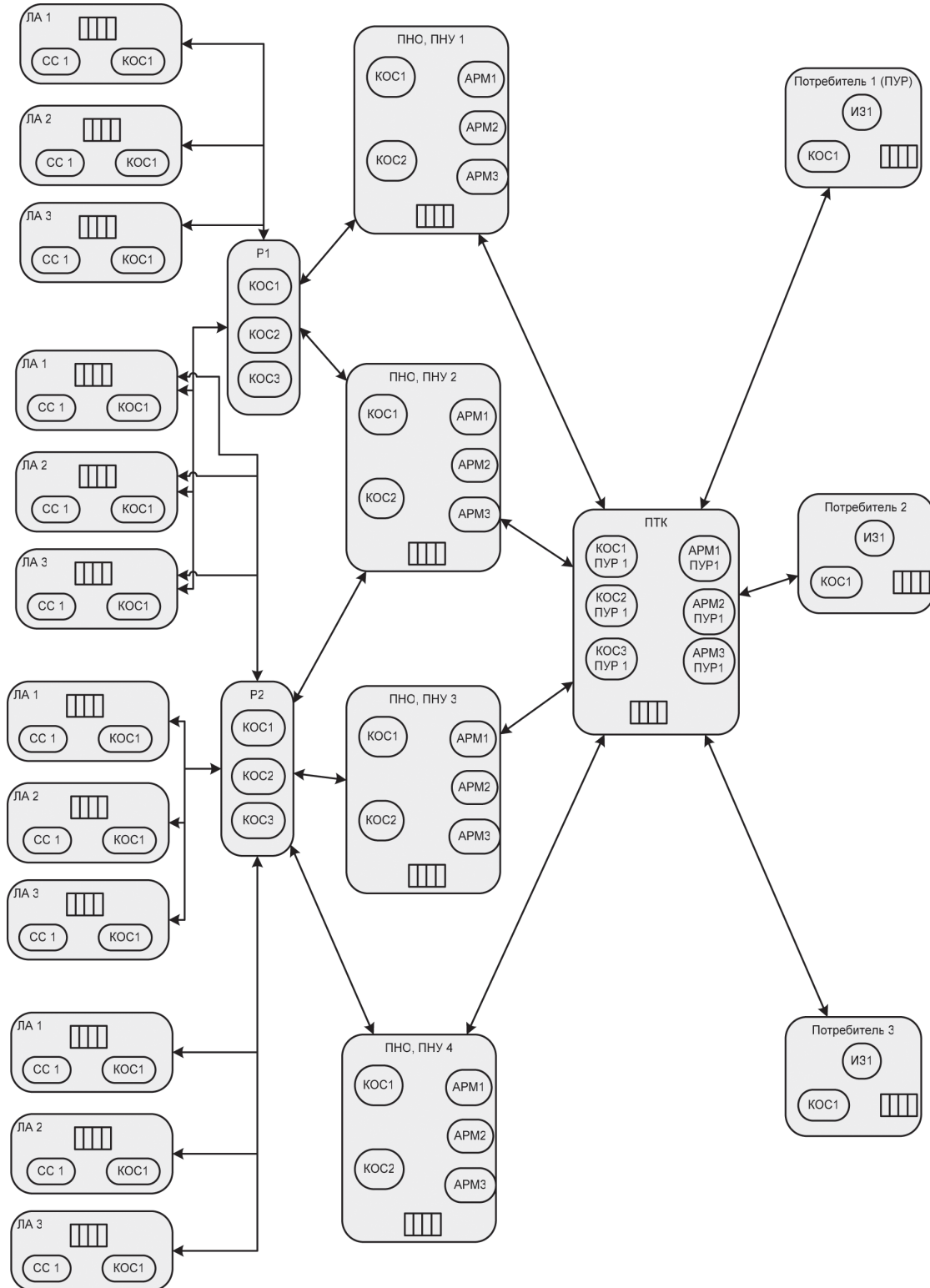


Рис. 2. Состав объектов и принципиальные направления потоков сообщений в имитационной модели системы мониторинга

рассматриваются как совокупность объектов трех типов: средств съёмки (СС), каналообразующих средств (КОС) и буфера данных.

Объекты СС позволяют с некоторой скоростью, в зависимости от расположения БЛА, получать изображения и осуществлять их первичную обработку на борту.

Каналообразующие средства — объекты, позволяющие с некоторой пропускной способностью передавать данные съёмки и получать управляющую информацию. Совокупность каналообразующих средств и каналов связи предлагается рассматривать в виде направленного графа. Узлам графа соответствуют КОС, а дугам — возможные каналы связи. Вес дуги отражает пропускную способность соответствующего канала. На рис. 3 и 4 показана часть модели с возможными каналами связи в направлении от потребителя (источника заявок) к БЛА (источнику данных съёмки) и в обратном направлении.

В имитационную модель закладываются специальные службы, реализующие алгоритм построения каналов связи и распределение задач между БЛА. Пакеты данных, которые необходимо передать, а также сроки, в которые они должны быть переданы, определяются исходя из плана съёмки, плана обработки и фактического состояния БЛА, АРМ и персонала.

Ретрансляторы представлены совокупностью КОС.

ПТК представлен совокупностью КОС и АРМ обработки получаемых данных. Для каждого АРМ определена скорость обработки. Предполагается, что различные АРМ предназначены для выполнения различных задач по обработке информации. Поэтому должна быть определена последовательность участия АРМ в подготовке данных. После обработки формуляры и кадры пересылаются на пункт управления мониторингом (ПУМ).

Предполагается, что ПУМ по своей логике, сходен с ПТК. Основное отличие заключается в

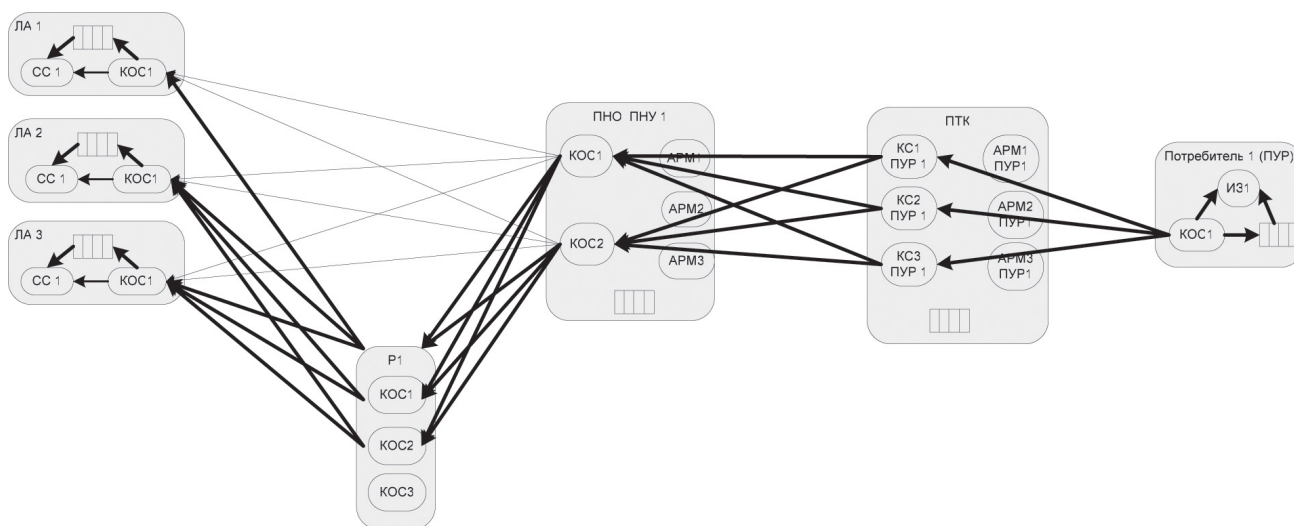


Рис. 3. Возможные каналы связи по направлению от потребителя к БЛА (на части объектов модели)

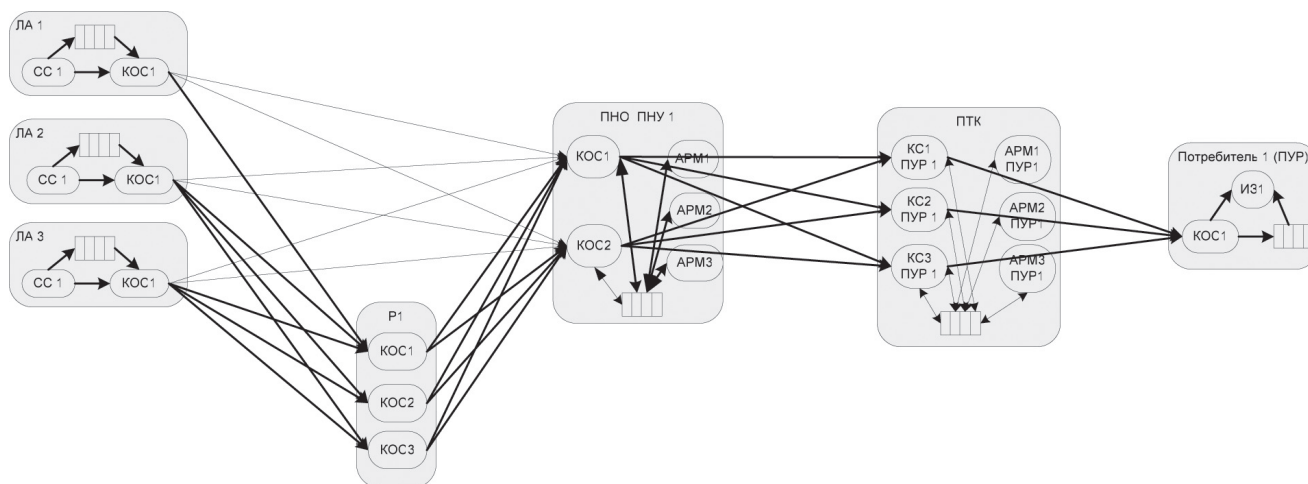


Рис. 4. Возможные каналы связи по направлению от БЛА к потребителю (на части объектов модели)

том, что управляющая информация для работы ПТК исходит с ПУМ. Когда все пары КОС оказываются под действием помех или подвергаются поражающим воздействиям, ПУМ не может изменить логику работы ПТК. На ПУМ осуществляется окончательная обработка данных мониторинга и передача результатов соответствующим потребителям.

Потребитель в модели представлен как носитель КОС. Он также является одновременно источником

заявок и приёмником данных съемки. Принимаем следующее допущение: источник заявок выдаёт пуассоновский поток, не зависящий от предыстории доставки данных мониторинга на предшествующие запросы.

Реализован программный макет имитационной модели системы мониторинга. UML-диаграмма классов программного макета приведена на рис. 5. Ниже представлено описание классов.

### Описание классов программного макета имитационной модели

- 1 Класс **CARMo** является классом активной части модели, под названием «Обрабатывающий АРМ». Объекты этого класса занимаются обработкой заявок, отправленных с «Управляющего АРМа». Описание класса содержится в файле ARMo.h, а реализация класса — в файле ARMo.cpp.
- 2 Класс **CARMu** является классом активной части модели, под названием «Управляющий АРМ». Объекты этого класса занимаются обработкой заявок, передаваемых от ЛА к ПНУ и обратно, управляют полетом ЛА, распределяют направления движения заявок. Описание класса содержится в файле ARMu.h, а реализация класса — в файле ARMu.cpp.
- 3 Класс **CBufer** описывает поведение буфера заявок в таких объектах модели, как ПНУ, ретранслятор и ЛА. Буфер сам по себе не выполняет никаких действий, а только реагирует на разные действия других объектов модели, таких, как: «извлечь 1-ю заявку из буфера», «поместить заявку в буфер». Описание класса содержится в файле Bufer.h, а реализация класса — в файле Bufer.cpp.
- 4 Класс **CCamera** является активным классом модели, объекты этого класса выполняют функции имитации съемки местности и отправляют данные съемки на ПНУ. Описание класса содержится в файле Camera.h, а реализация класса — в файле Camera.cpp.
- 5 Класс **CCOS** является активным классом модели, объекты этого класса выполняют функции каналообразующего средства (КОС), по которому передаются данные от одного объекта модели к другому (от ПНУ к ЛА через ретранслятор), и могут поддерживать цепь соединений через другие каналообразующие средства. Описание класса содержится в файле COS.h, а реализация класса — в файле COS.cpp.
- 6 Класс **CEventQueue** описывает очередь из событий CEvent. События сортируются в восходящем порядке по полю time, что обеспечивает выполнение событий в правильном порядке. Класс работает с указателями на CEvent. Описание класса содержится в файле EventQueue.h, а реализация класса — в файле EventQueue.cpp.
- 7 Класс **CGadget** является базовым классом для всех объектов модели. Конкретные устройства получают наследованием этого класса. Дочерние классы должны реализовывать абстрактный метод EventHendler(), в котором происходит обработка текущего события. Описание класса содержится в файле Gadget.h, а реализация класса — в файле Gadget.cpp.
- 8 Класс **CGadgetMap** является классом управления списком устройств (активных участников модели). Все доступы к объектам осуществляются через данный класс. Описание класса содержится в файле GadgetMap.h, а реализация класса — в файле GadgetMap.cpp.
- 9 Класс **CHistory** описывает ведение логов отдельных частей модели и используется для составления полной картины событий модели. Описание класса содержится в файле History.h, а реализация класса — в файле History.cpp.
- 10 Класс **CItemList** описывает список идентификаторов однотипных объектов и методы работы с этим списком. Описание класса содержится в файле ItemList.h, а реализация класса — в файле ItemList.cpp.
- 11 Класс **CIZ** — активный класс модели, выполняет функции источника заявок модели. Заявки генерируются в зависимости от установленной интенсивности. Описание класса содержится в файле IZ.h, а реализация класса — в файле IZ.cpp.
- 12 Класс **CLA** — активный класс модели, выполняющий функции летательного аппарата. Описание класса содержится в файле LA.h, а реализация класса — в файле LA.cpp.

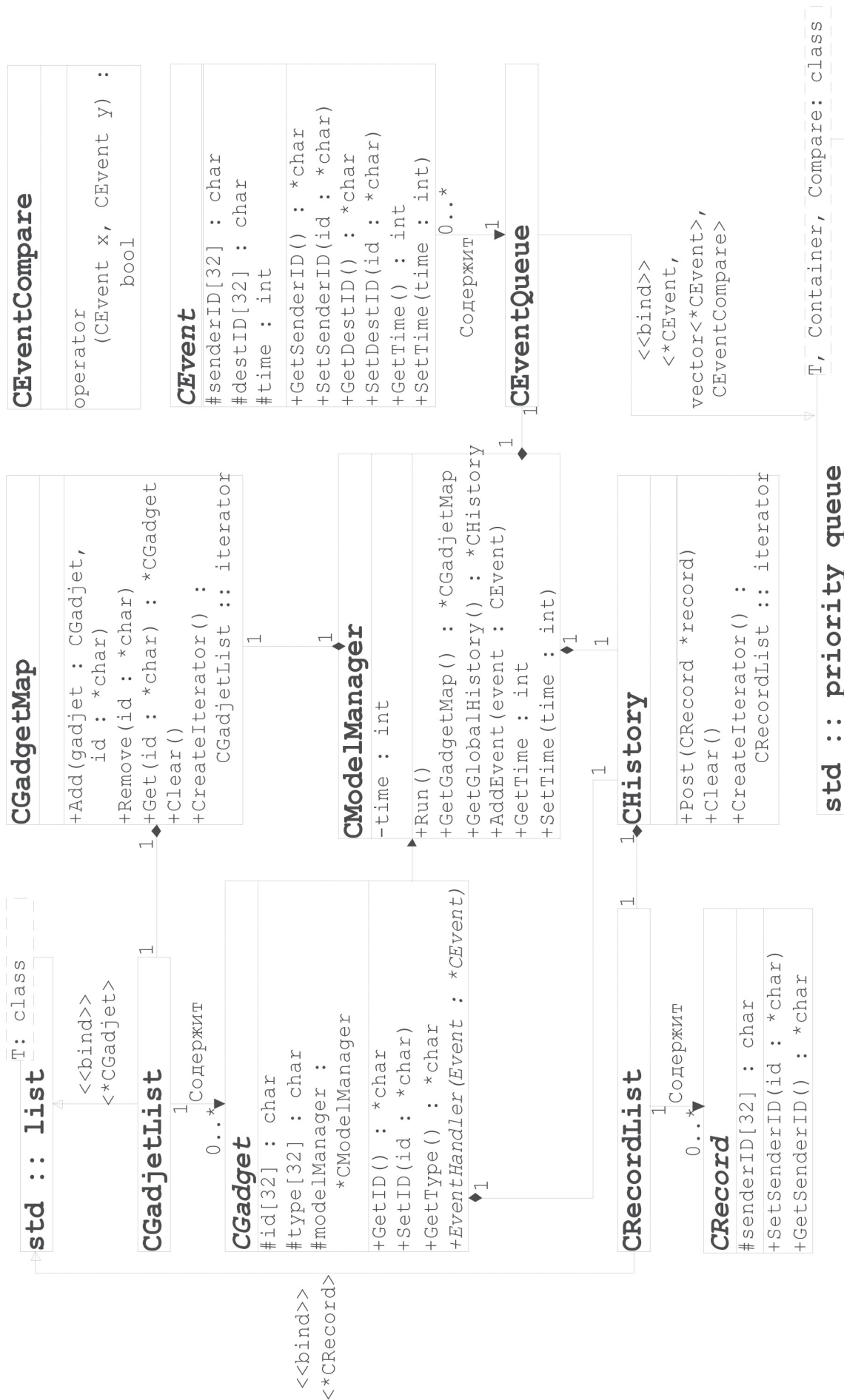


Рис. 5. UML-диаграмма классов имитационной модели

- 13 Класс CModelManager — основной класс модели, занимающийся обработкой и выполнением событий модели, он организует циклическую работу модели по событиям. Описание класса содержится в файле ModelManager.h, а реализация класса — в файле ModelManager.cpp.
- 14 Класс CPNU активный класс модели, выполняющий функции ПНУ и обрабатывающий передачу данных между его составными частями. Описание класса содержится в файле PNU.h, а реализация класса — в файле PNU.cpp.
- 15 Класс CPZ активный класс модели, отвечающий за прием заявок после обработки. Описание класса содержится в файле PZ.h, а реализация класса — в файле PZ.cpp.
- 16 Класс CRecord — класс, описывающий абстрактную запись для хранения информации в истории объектов. Описание класса содержится в файле Record.h, а реализация класса — в файле Record.cpp.
- 17 Класс CRetranslator — активный класс модели, выполняющий функции ретрансляторной установки и включенного в нее блока КОС. Описание класса содержится в файле Retranslator.h, а реализация класса — в файле Retranslator.cpp.
- 18 Класс CTransact — класс, описывающий транзакты в модели, имитирующие передаваемые данные в системе. Описание класса содержится в файле Transact.h, а реализация класса — в файле Transact.cpp.
- 19 Класс CTransactMap — класс, являющийся глобальным списком заявок модели, используется для управления заявками. Описание класса содержится в файле TRansactMap.h, а реализация класса — в файле TRansactMap.cpp.
- 20 Класс CTransactQueue — класс очереди заявок в буферах модели и методы по управлению списками. Описание класса содержится в файле TransactQueue.h, а реализация класса — в файле TransactQueue.cpp.
- 21 Класс CVehicle — класс-потомок класса CGadget, является описателем класса передвижных средств модели, таких как ретранслятор, БЛА и ПНУ. Описание класса содержится в файле Vehicle.h, а реализация класса — в файле Vehicle.cpp.

### Пример моделирования гипотетической системы мониторинга

Для предварительной оценки эффективности организации системы мониторинга было проведено имитационное моделирование на описанном выше программном макете. Сравнивались следующие стратегии:

1. Каждой стартовой группе выделяется своя зона мониторинга. Один БЛА находится в резерве на базе и вылетает по требованию на съемку точечных объектов или для замены БЛА с истраченным запасом топлива либо ЛА, вышедшего из строя. Остальные ЛА осуществляют площадную съемку.

2. Совместная зона съемки для всех стартовых групп. По всем стартовым группам имеется три резервных БЛА для замены отработавших, все остальные осуществляют площадную съемку в зонах условного разделения. В случае потребности в точечной съемке объекта ближайший к этой зоне интереса БЛА направляется для проведения съемки, а условное разделение зон площадной съемки перераспределяется.

При имитационном моделировании полагалось, что обновление площадной съемки по зоне интереса должно происходить в течение часа. Средний интервал между заявками на точечную съемку составляет 1 час при вероятности доставки данных в

течение 20 мин не ниже 0,9. Вероятность появления объекта в заявке на точечную съемку имеет двумерную равномерную плотность распределения по площади зоны интереса. Вероятность выхода из строя ЛА составляет 0,05 за время полета на максимальную дальность (4 часа). Время подлёта от базы к ближайшей точке зоны интереса составляет 20 мин. В качестве критерия эффективности выбрано выражение

$$E = \frac{S_{\text{обн}} / S_{\text{общ}} + 5P_{\text{обс}} / P_{\text{общ}}}{6},$$

где  $S_{\text{обн}}$  — количество объектов, обнаруженных на площадной съёмке;  $S_{\text{общ}}$  — общее количество объектов, подлежащих обнаружению на площадной съёмке;  $P_{\text{обс}}$  — количество вовремя обслуженных заявок на точечную съемку;  $P_{\text{общ}}$  — общее количество заявок на точечную съемку. Величина  $E$  нормирована, доля обслуженных заявок на точечную съемку имеет весовой коэффициент 5/6.

При заданных условиях результаты имитационного моделирования показали, что вторая стратегия даёт значение критерия эффективности 0,72, что на 9,3% выше, чем значение, которое даёт первая стратегия (0,627).



**Выводы**

1. Построена концептуальная модель сложной системы мониторинга, использующей комплекс БЛА в совокупности с системами управления, обработки и доставки информации.

2. Разработана имитационная модель, позволяющая решать задачи оценки эффективности системы мониторинга на этапе проектирования, а также при выборе стратегий наблюдения (съемки) при ее использовании.

3. Проведено тестирование разработанной модели на ряде гипотетических примеров в широком диапазоне исходных данных, показавшее ее работоспособность и непротиворечивость.

**Библиографический список**

1. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, В.Н. Новиков, С.Г. Парафесь, М.Д. Пестов, И.К. Туркин / Под ред. И.С. Голубева и И.К. Туркина. — Изд. 2-е. — М.: Изд-во МАИ, 2009. — 453 с.
2. Беспилотные летательные аппараты. Состояние и тенденции развития / Под ред. Ю.Л. Иванова. — М.: Варяг, 2004. — 175 с.
3. Максимов Н.А., Подлипьян П.Е. Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. Вып. №43. URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24769>

## A MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE MONITORING SYSTEM USING A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

**Maksimov N.A. \*, Skleimin Yu.B. \*\*, Sharonov A.V. \***

*Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

*\* e-mail: k308@mai.ru*

*\*\* e-mail: skleymin@yandex.ru*

**Abstract**

We can get maximum effect from the use of unmanned aerial vehicles (UAV), if a certain infrastructure, including a group of UAVs, mobile control tools, system of commands and information receiving and transmission, as well as information-processing equipment is formed. The transition from the use of single UAVs to highly organized UAV complexes assumes the availability of advanced supporting and control complexes. Their creation is impossible without preliminary analysis and modeling of the processes of information interoperability of separate systems, included in such complexes.

The paper describes a conceptual model of complex monitoring system built by the authors, which uses UAV complex combined with both control systems and systems of information processing and delivery.

*The object of modeling* are information processes, occurring in supporting and control complexes: monitoring data acquisition, its transmission through the channel forming means and processing at various facilities distributed among the transmission path.

*The goal of modeling:*

— identification of successful strategies of complexes organization and functioning:

— operational feasibility checking of monitoring schedule, processing and connection under conditions of random interferences and hardware failure (or killing effects for military applications);

— the possibility of using the model as an instrument for monitoring current system conditions with the use of real data;

— the possibility of operational rescheduling caused by unexpected changing of system operating conditions.

Statistics obtained as a result of the imitation modeling enables evaluation of different approaches to organization and operation strategy of the system, and obtaining an starting point for more detailed, and hence more laborious optimization, reducing the search for optimal solution set.

The developed imitation model allows evaluate the effectiveness of monitoring system at the stage of design, and can be useful for monitoring (shooting) strategies selection.

The developed model was tested on a series of hypothetic examples distinct from each other in strategies of UAV use for fulfilling the task of surveying the territory with pin-point targets located on it. The modeling was carried out in the wide range of initial data and revealed operating capacity and non-contradiction of the developed imitation model.

Developers of software tools and algorithms for information interaction can be users of the imitation model. Besides them, the described model can be used for distribution of tasks among UAVs belonged to different launch teams.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, imitation model, data transmission system, performance evaluation, design, testing.

### References

1. Afanas'ev P.P., Golubev I.S., Novikov V.N., Parafes' S.G., Pestrov M. D., Turkin I.K. *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Osnovy ustrojstva i funkcionirovanija* (Unmanned aerial vehicles. Basics of structure and functioning), Moscow, MAI, 2009, 453 p.
2. Ivanov Yu.L. *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Sostojanie i tendencii razvitiija* (Unmanned aerial vehicles. State-of-the-art and development trends), Moscow, Varjag, 2004, 175 p.
3. Maksimov N.A., Podlip'jan P.E. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2011, no 43, available at: <https://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=24769> (accessed 20.04.2015).