

О.Б. Ачасов, кандидат технических наук,
доцент
М.В. Астраханцев
И.И. Олейников

Обоснование требований к системам мониторинга околоземного космического пространства при стратегическом сдерживании

Рассматриваются вопросы современного состояния околоземного пространства (ОКП), создания систем мониторинга ОКП. Описан метод обоснования требований к точности координатных измерений средствами системы мониторинга ОКП.

Стратегическое сдерживание – это комплекс взаимосвязанных политических, дипломатических, информационных, экономических, военных и других мер, направленных на сдерживание, снижение и предотвращение угроз и агрессивных действий со стороны какого-либо государства (коалиции государств) путем демонстрации возможности ответных мер для противоположной стороны или адекватной угрозой неприемлемых для нее последствий в результате ответных действий. В настоящее время в условиях обострения международной политической обстановки и санкций против России стратегическое сдерживание становится одной из важнейших задач обеспечения безопасности государства.

Околоземное космическое пространство (ОКП), являясь одновременно и потенциальным театром военных действий, и мощным информационным плацдармом для обеспечения ситуационной осведомленности, разведывательных и других операций в мирное время, стало сферой столкновения интересов различных государств, которые вступили в новую фазу геополитического противоборства – в фазу борьбы за достижение стратегического превосходства в космосе.

Действующие положения международного космического права позволяют использовать космос в военных целях, накладывая строгие ограничения лишь на размещение и испытания в космосе оружия массового поражения. Однако, в условиях эскалации военно-политической обстановки и в кризисных ситуациях руководство ряда государств может прибегнуть к «широкому толкованию» и отказу от некоторых «невыгодных» положений международного права. Кроме того, предпринимаются попытки изменения международного политического права в направлении дискриминации России, навязываются правила поведения в космосе.

Через решение мирных задач противником осуществляется разведка и демонстрация потенциальных возможностей по завоеванию превосходства в космосе и возможности беспрепятственного применения силы и высокоточного оружия в любой точке Земли и околоземного пространства.

Международные космические проекты, включая борьбу с астероидами с применением ядерных взрывов, позволяют легендировать натурную отработку практически всех ключевых элементов военно-космических средств. Россия получает открытый космический полигон, которого у страны нет. Следовательно, и у России есть мощнейший механизм демонстрации влияния на ситуацию в космосе в рамках его мирного освоения. Вклад Минобороны России в стратегическое сдерживание в космической сфере бесспорен [1].

Вместе с тем, данный вид деятельности в России слабо скоординирован. Механизм мирной демонстрации возможностей по препятствованию другим странам доступа в космическое про-

странство используется не в полной мере. Нет концептуальных документов по решению задач стратегического сдерживания в рамках мирного освоения космоса.

В этих условиях США и европейские страны будут проводить все перечисленные выше «мирные» космические операции и в ближайшем будущем ими будут получены технологические прорывы. Россия может потерять космический потенциал сдерживания и значительную часть рынка космических услуг.

Помимо угроз безопасности России, исходящих от недружественных нам государств, существуют угрозы, исходящие из космоса – космический мусор и астероидно-кометная опасность.

Современное состояние ОКП. Интенсивность освоения космического пространства привела к тому, что космическая обстановка мирного времени стала динамичной с точки зрения опасных ситуаций, связанных со сближениями и падениями космических объектов (КО). Обнаружение и сопровождение опасных ситуаций в ОКП стало повседневной задачей мирного времени.

В последние годы операторы космических аппаратов (КА) все чаще и чаще получают предупреждения об угрозе столкновения функционирующих КА с каталогизированными объектами космического мусора (КМ). Столкновение КА с таким КМ в лучшем случае повлечет за собой полную или частичную потерю функциональности КА, а в худшем случае – сильный взрыв с образованием большого количества новых фрагментов КМ.

По состоянию на 1 января 2016 г. общее количество находящихся в космическом пространстве и каталогизированных в базах данных космических объектов (КО) техногенного происхождения (размером более 10 сантиметров) составило – 17 472 КО, из них 1442 КО – это действующие КА, остальные 16 030 КО относятся к КМ, в том числе¹:

- недействующие КА – 2 689;
- разгонные блоки (РБ) и последние ступени ракет-носителей (РН) – 1931;
- фрагменты КА, РБ, последних ступеней РН и операционные элементы (ОЭ) – 11 410.

Процентное соотношение КО в ОКП по их типу приведено на рисунке 1.

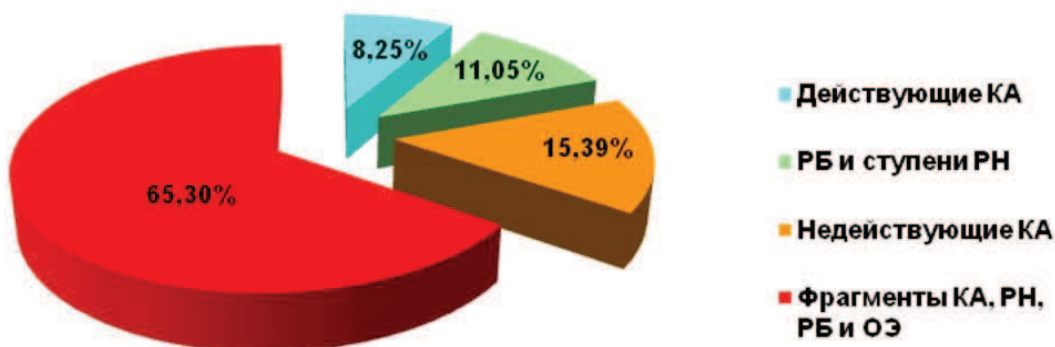


Рисунок 1 – Соотношение космических объектов в околоземном пространстве по их типу

Распределение КМ в ОКП по состоянию на 1 января 2016 г. составило:

- 12 488 объектов КМ (77,9%) – в низкоорбитальной области ОКП;
- 2 100 объектов КМ (13,1%) – в области высокоэллиптических орбит;
- 1010 объектов КМ (6,3%) – в области геостационарных орбит;
- 224 объекта КМ (1,4%) – в области средневысоких орбит;
- 208 объектов КМ (1,3%) – в других областях космического пространства.

1 События в околоземном космическом пространстве. Декабрь 2015. Баллистический центр ФГУП ЦНИИмаш, № 12 (67) // www.aspos.mcc.rsa.ru

Наибольшее количество объектов космического мусора принадлежит таким странам, как Россия (6 169 КО), США (4 878 КО) и Китай (3 645 КО).

Процентное соотношение объектов КМ по их принадлежности приведено на рисунке 2.

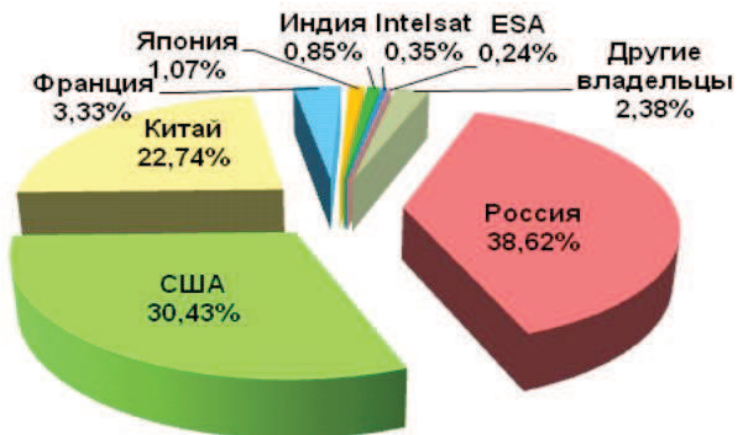


Рисунок 2 – Соотношение объектов КМ по их принадлежности

Как видно, количество действующих КА не превышает 8% от числа каталогизированных КО. Космического мусора уже так много, что он представляет существенную угрозу для осуществления космической деятельности и влияет на полетную ситуацию в космосе, диктуя полетные правила (рисунок 3). С течением времени эта тенденция будет только усиливаться. Соответственно будет расти влияние КМ на присутствие России в космосе.

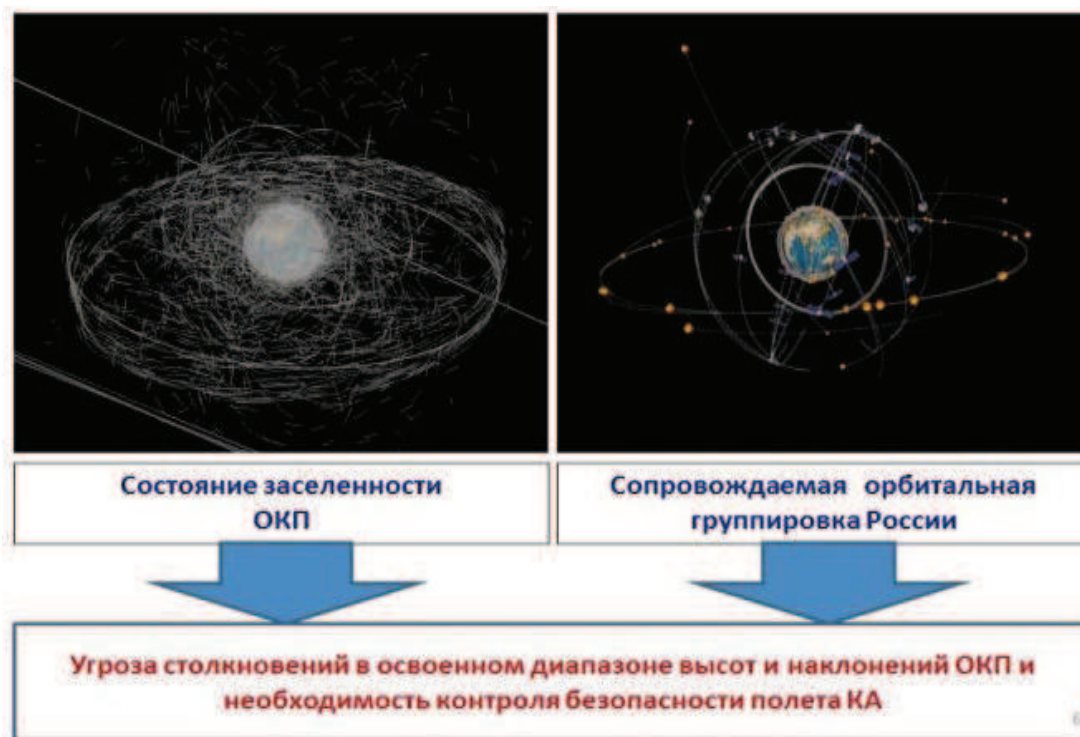


Рисунок 3 – Влияние техногенного засорения ОКП на космическую деятельность

Безопасность КА на орбите. На сегодняшний день единственным возможным способом избежать столкновения с каталогизированным КМ является проведение маневра уклонения, который повлечет непредусмотренные топливные затраты с дальнейшим уменьшением срока функционирования КА, возможный срыв программы полета и вытекающие из этого проблемы. Для

защиты КА от столкновения с фрагментами КМ (размером менее 1 см) и микрометеороидами используются специальные защитные конструкции.

Начиная с выведения первого элемента Международной космической станции (МКС) (20 ноября 1998 г. – модуль ФГБ), американский и российский Центры управления полетами приступили к обеспечению полета станции в условиях техногенного засорения космического пространства. Российскими и американскими специалистами по управлению движением была разработана процедура по реализации маневра уклонения станции от прогнозируемого опасного сближения с КО риска.

За время функционирования МКС поступило около 500 предупреждений нарушения объектами КМ зоны безопасности МКС (рисунок 4). Было проведено 24 маневра уклонения (последний – 27 сентября 2015 г. из-за опасности столкновения с фрагментом ступени американской РН «Pegasus»).

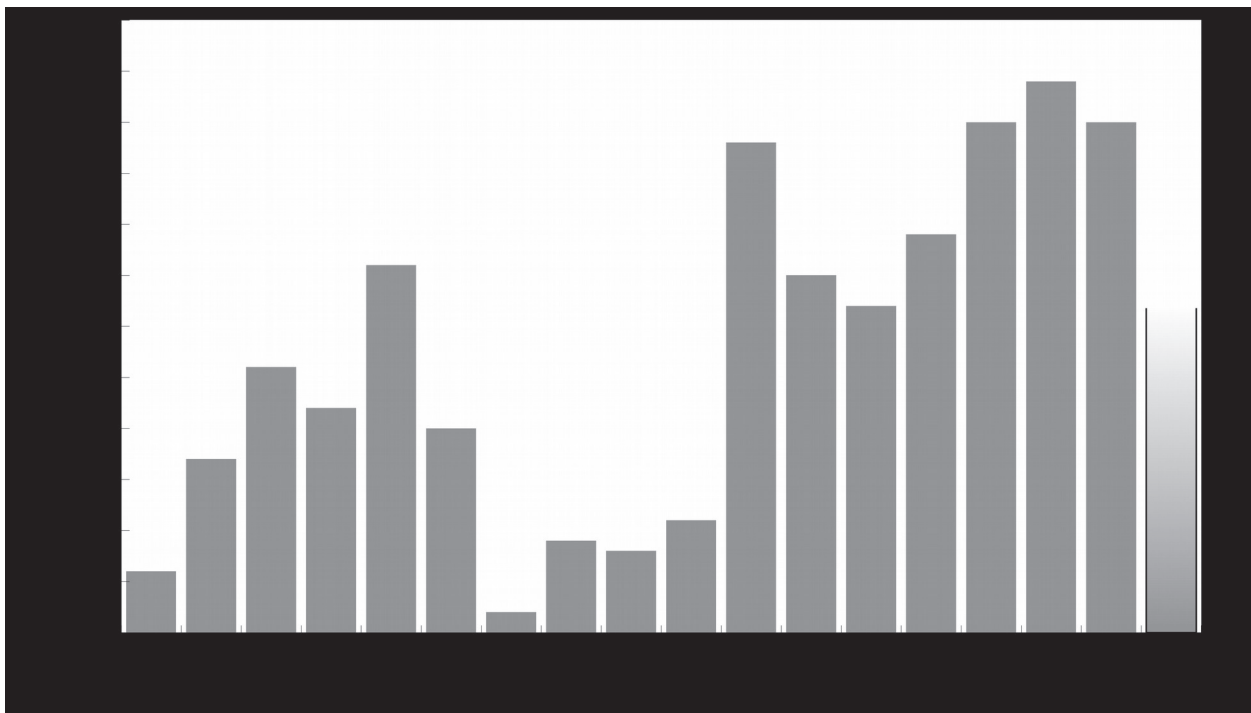


Рисунок 4 – Количество предупреждений нарушения объектами КМ зоны безопасности МКС

Перспективы мониторинга ОКП. Угрозы, связанные с действиями недружественных России государств, и угрозы, возникающие вследствие возможного воздействия техногенного засорения ОКП на космическую деятельность государства, взаимосвязаны (рисунок 5). Прикрываясь опасностью, исходящей от космического мусора, США демонстрирует свои информационные возможности по ситуационной осведомленности в ОКП и осуществлению широкомасштабных разведывательных операций. Задачи по обеспечению стратегического сдерживания путем демонстрации своих информационных возможностей Россией в мирное время не определены. Вместе с тем состояние и возможности систем мониторинга ОКП в мирное время определяют готовность государства к обеспечению боевых действий при возникновении военного конфликта.

Противоборство в космосе вышло за рамки привычных сценариев, его акцент смещен на мирное время, космическая обстановка прогнозируемого будущего, по сравнению с ожидавшейся до недавнего времени и на которую ориентированы существующие системы мониторинга ОКП, будет иметь особенности для мирного времени. В космосе уже (в мирное время) раз-

вернута борьба за гарантированный доступ и беспрепятственное и безопасное управление орбитальной группировкой КА и системы мониторинга ОКП должны принимать в этом непосредственное участие. Создание и развитие систем мониторинга ОКП – также один из путей решения задачи борьбы с КМ [2].



Рисунок 5 – Угрозы космической деятельности государства

Обоснование требований к системе мониторинга. Наиболее важными характеристиками системы мониторинга ОКП являются точность сопровождения КО в системе и точность информации, получаемой от измерительных средств системы. Обоснование требований к точности информации является отдельной научной задачей [3]. При этом система мониторинга рассматривается как система предупреждения об опасных ситуациях в ОКП, в состав характеристик которой предлагается включить характеристики достоверности предупреждений о наличии или отсутствии опасных ситуаций в ОКП [4]. В качестве анализируемой величины используется плотность распределения ошибок сопровождения КА/КО – $P_{КА}$ и $P_{КО}$.

Положение КА/КО в пространстве в каждый момент времени полностью определяется вектором его состояния, который связан с вектором уточненных параметров траектории КА/КО по траекторным измерениям и вектором мешающих параметров.

Для предъявления требований к системе мониторинга формируется достоверная матрица ошибок K [4] прогнозируемых параметров вектора состояния КА/КО на момент опасного сближения, которая характеризует ошибки определения положения КА/КО и зависит от точности измерений текущих навигационных параметров и точности выбранной модели движения КА/КО.

Предположим, в системе мониторинга заданы пороговые значения характеристик достоверности предупреждения, исходя из которых с применением критерия минимума среднего риска [4] принимается решение о наличии или отсутствии опасной ситуации в ОКП.

Средний риск $M\{S\}$ зависит от характеристик опасности столкновения в ОКП и стоимостных характеристик (потери аппарата и проведения ненужного маневра) и рассчитывается по формуле:

$$M\{S\} = S_{01} \bar{D} P(A_1) + S_{10} F P(A_0),$$

где S_{01} – стоимость пропуска столкновения, т.е. стоимость потери КА;

S_{10} – стоимость ложной тревоги, т. е. стоимость проведения ненужного маневра;

\bar{D} – вероятность пропуска столкновения;

F – вероятность ложной тревоги;

$P(A_1)$ – вероятность события «столкновение есть»;

$P(A_0)$ – вероятность события «столкновения нет».

График зависимости стоимости среднего риска от расстояния между защищаемым КА и КО «риска» при заданных значениях вероятности ложной тревоги F и пропуска столкновения D представлен на рисунке 6.

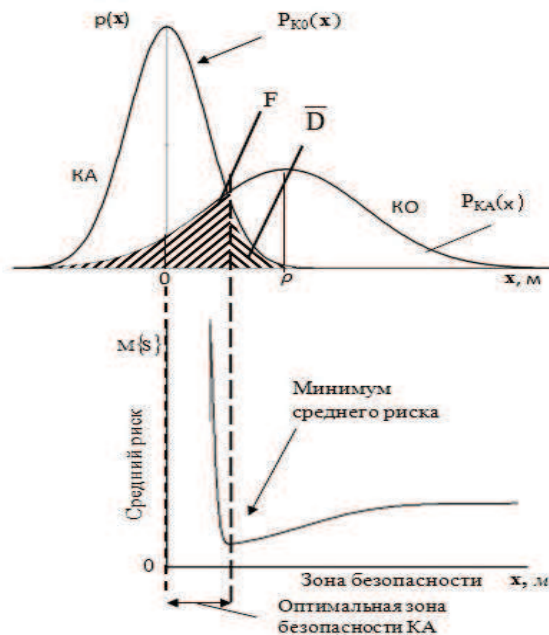


Рисунок 6 – Зависимость стоимости среднего риска от расстояния между защищаемым КА и КО «риска»

Как видно из рисунка, минимум функции среднего риска $M\{S\}$ соответствует оптимальному радиусу зоны безопасности КО и принятию решения о формировании предупреждения о наличии или отсутствии столкновения. Следовательно, по результатам перебора возможных значений радиуса зоны безопасности могут быть определены оптимальные значения конфликтующих показателей – вероятности ложной тревоги и пропуска столкновения.

Для обоснования требований к системам мониторинга ОКП, которые должны функционировать при обеспечении выполнения задаваемых пороговых значений вероятности ложных тревог и пропуска опасных ситуаций, предлагается следующий метод формирования требований к точности координатных измерений на средствах системы мониторинга и анализа опасных ситуаций в ОКП.

Исходными данными являются:

заданная достоверность предупреждения об опасных ситуациях, определяемая, исходя из приемлемых значений вероятности ложных тревог и пропуска опасных ситуаций;

ресурс времени, определяемый циклом управления и необходимый для реализации мероприятий в оперативном контуре управления КА по подготовке и проведению маневра уклонения.

Необходимо определить пороговое значение достоверности опасного сближения.

Общая схема решения задачи:

Используя изложенную в [5] методику, формируем пороговые значения достоверности предупреждения об опасной ситуации для различных типов орбит и КА.

Ошибка $\sigma_{КО}$ определения положения КА/КО в точке опасного сближения определяется матрицей ошибок K . Данная матрица включает в себя ошибки $\sigma_{опр}$ определения вектора состо-

яния по координатной информации измерительных средств системы мониторинга и ошибки $\sigma_{пр}$, связанные с прогнозированием движения КА/КО с учетом влияния различных факторов:

$$\max \sigma_{КО} \geq \sqrt{\sigma_{опр}^2 + \sigma_{пр}^2}, \tag{4}$$

где $\sigma_{опр}$ – ошибка определения орбит КО и КА;

$\sigma_{пр}$ – ошибка прогноза орбит КО и КА.

На рисунках 7 и 8 представлен процесс нарастания ошибок определения положения КА/КО во времени и показано влияние этих ошибок на обеспечение заданной достоверности предупреждения об опасной ситуации [4].

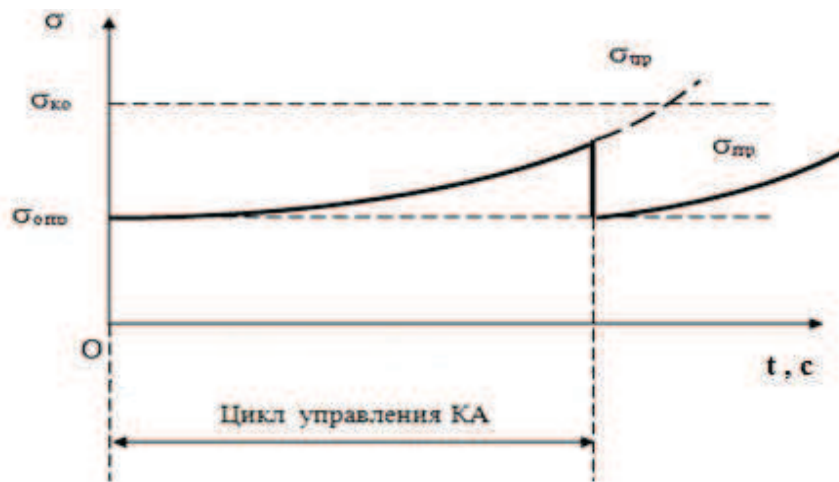


Рисунок 7 – Нарастание ошибок определения положения КА/КО во времени

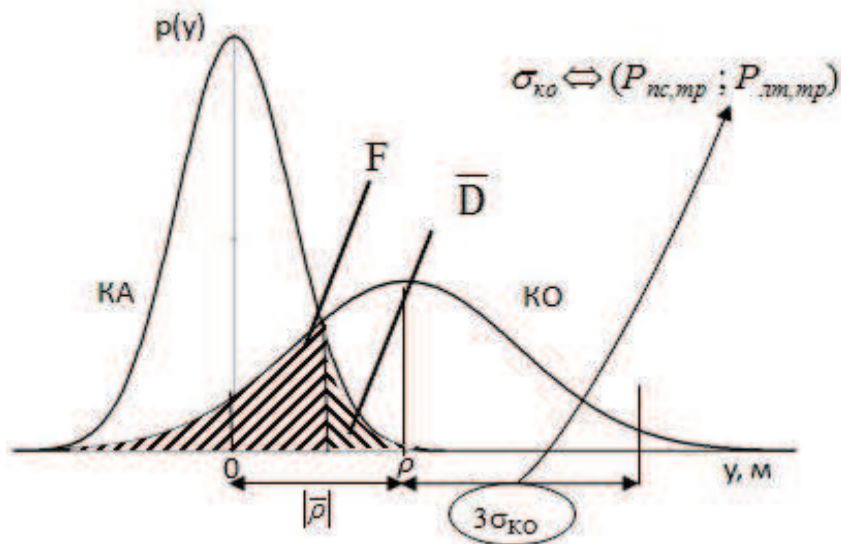


Рисунок 8 – Влияние ошибок определения положения КА/КО на обеспечение заданной достоверности предупреждения об опасной ситуации

Задача системы – не допустить превышения ошибок точности сопровождения КО максимального допустимого значения для обеспечения заданных пороговых значений достоверности опасного сближения за счет предъявления требований к ошибкам определения положения КА/КО, которые зависят от точности координатной информации средств системы мониторинга и рассчитываются с учетом определения матрицы ошибок прогнозируемых параметров вектора

состояния КА/КО на момент опасного сближения и матрицы ошибок, характеризующей точность определения вектора уточненных по траекторным измерениям параметров траектории КА/КО.

Также точность сопровождения определяется с учетом ошибок прогноза на интервале времени, соответствующем времени цикла управления КА, времени подготовки маневра и мерному интервалу.

С применением предложенного подхода проведено моделирование и показано, что перспективная система должна соответствовать требованию по максимальной ошибке ($3\sigma_{КО}$) определения положения потенциально опасных КО, не превышающей 1 км на момент формирования решения о наличии опасной ситуации для всех типов орбит. При этом $\sigma_{опр}$ на средствах измерения системы не должны превышать 100-500 м в зависимости от типов орбит.

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением приведенных оценок с результатами, полученными другими авторами [6, 7, 8].

Представленный метод формирования требований к точности координатной информации средств систем мониторинга ОКП позволяет оптимизировать требования и характеристики для достигнутого состава системы и тем самым способен повысить эффективность ее работы при решении задач снижения риска выхода из строя КА в результате столкновения с КО риска.

Перспективная система мониторинга ОКП должна обладать следующими характеристиками:

- 1) область космического пространства, в которой система обеспечивает решение поставленных задач:
 - по высотам – 80...50 000 км;
 - по наклонениям орбит КО – 0°...180°;
 - по долготам геостационарных КО – 0°...360°;
- 2) количество сопровождаемых КА:
 - в низкоорбитальной области (НОО) – 40;
 - в геостационарной области (ГСО) – 25;
 - в области средневысоких орбит (СВО) – 40;
 - в области высокоэллиптических орбит (ВЭО) – 15;
- 3) интервал времени предупреждения об опасных сближениях:
 - в НОО – 20 витков;
 - в ГСО, СВО, ВЭО – 15 витков;
- 4) ошибка определения времени падения КО риска – не более 20% от времени оставшегося существования;
- 5) пропускная способность по сопровождению опасных ситуаций на суточном интервале:
 - количество опасных сближений в НОО – 19;
 - количество опасных сближений в ГСО – 10;
 - количество опасных сближений в области СВО – 13;
 - количество падающих КО – 15;
- 6) размер контролируемых потенциально опасных КО: 5...10 см и более в зависимости от типа орбит;
- 7) максимальная ошибка определения положения потенциально опасных КО вдоль орбиты для сопровождения КО в системе:
 - в НОО < 30 км;
 - в СВО < 20 км;
 - в ВЭО < 80 км;

в ГСО < 30 км;

8) максимальная ошибка определения положения потенциально опасных КО для формирования предупреждения об опасной ситуации < 1 км для всех типов орбит.

Наличие такой системы мониторинга ОКП позволит оценивать обстановку в космосе, контролировать полеты своих КА и наблюдать за полетом чужих КА, предупреждать об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором, а также проявить себя в новой составляющей стратегического сдерживания – сдерживании конкурентов от дискриминационных действий в отношении России путем демонстрации на международном уровне ситуационной осведомленности и формирования международных полетных правил в ОКП.

Это, в конечном итоге, позволит диктовать правила поведения в космосе в мирное время.

Список использованных источников

1. Вартаньян Ю.А., Олейников И.И., Убоженко Д.Ю. Система контроля космического пространства как элемент стратегического сдерживания // Военная мысль. – 2015. – № 9.

2. Олейников И.И., Шилин В.Д. Область контроля – околоземное пространство. – М.: ИАИ «Воздушно-космическая оборона», 2010.

3. Олейников И.И. Формирование требований к точности координатных измерений средствами системы мониторинга околоземного космического пространства // Полет. – 2014. – № 12.

4. Олейников И.И., Новиков П.В. Обоснование требований к системам предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве, исходя из критерия минимума среднего риска // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 4 (69). – С. 199-206.

5. Олейников И.И., Павлов В.П., Аксенов О.Ю. Стратегия расчета вероятности безопасного порога сближения двух космических объектов // Вестник МАИ. – 2012. – № 2. – С. 18-28.

6. Хуторовский З.Н., Бойков В.Ф., Пылаев Л.Н. Контроль космических объектов на низких высотах. Околоземная астрономия. – М., 1998.

7. Хуторовский З.Н. Риск столкновений на низких высотах с учетом некаталогизированных объектов. Околоземная астрономия (космический мусор). – М.: Институт астрономии РАН, 1998.

8. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. – М.: ИКИ РАН, 2013.