

УДК 629.78

Проектирование спутниковых систем непрерывного обзора: краткий исторический обзор, современное состояние и новые решения

Ю.П. Улыбышев

Аннотация

Представлен краткий обзор развития методов проектирования спутниковых систем непрерывного обзора. Описываются результаты сравнения основных типов систем на круговых орбитах для непрерывного глобального обзора. Демонстрируется табличная классификация спутниковых систем на стыке понятий «тип системы» и «тип обзора». Представлены новые методы выбора структур спутниковых систем (СС). Рассматриваются два типа непрерывного обзора. Первый – это традиционный обзор связанный с видимостью точек на поверхности Земли, второй - более сложный обзор для произвольных географических областей, т.е. в любой момент времени эта область находится полностью или частично внутри мгновенного поля обзора одного из спутников системы. Ключевая идея методов основана на совместных двумерных отображениях спутниковых систем и требований по обзору. Размерности этого пространства – инерциальная долгота восходящего узла (или прямое восхождение восходящего узла) и время. В этом пространстве требования по обзору любой области могут быть представлены в виде полигона граничных точек, а движение спутниковой системы в виде равномерно движущейся решетки. В любое время как минимум один из узлов решетки должен принадлежать этому полигону. Оптимальная конфигурация спутниковой системы соответствует наиболее разряженной решетки. Метод подходит для непрерывного и периодического обзора с использованием круговых и эллиптических орбит. Алгоритмической основой для методов является современная вычислительная геометрия. Представлен пример кинематически правильной системы на круговых орбитах для непрерывного обзора географической области. Методы распространены на проектирование спутниковых систем на эллиптических орбитах типа «МОЛНИИ»: непрерывный зональный обзор и однотрассовая системы обзора территории России.

Ключевые слова

спутниковые системы; проектирование спутниковых систем; непрерывный обзор; обзор областей; орбиты типа «МОЛНИИ»

1. Об истории и современном состоянии проектирования спутниковых систем непрерывного обзора

1.1. СС на круговых орбитах - простейший обзор

В большинстве методов проектирования СС рассматривался простейший непрерывный обзор, подразумевающий, что для каждой точки на поверхности Земли (всей или в широтном слое) виден как минимум один спутник с некоторым минимальным углом возвышения. При этом соседние точки могут наблюдаться в общем случае другими спутниками. И наоборот, наблюдатель на поверхности Земли видит один из спутников, а соседние с ним наблюдатели могут не видеть этот спутник, а наблюдать другие.

Пионерской и, видимо, самой первой в мире работой по спутниковым системам была статья Артура Кларка, опубликованная в 1945г. [1], в которой предлагалась система глобальной связи из трех геостационарных спутников, размещенных по экватору Земли через 120 градусов по долготе. Первые методические работы по выбору структур спутниковых систем, размещаемых на круговых орбитах в нескольких орбитальных плоскостях, относятся к началу 60-х годов прошлого века [2-6]. Некоторые из них [3] базировались на выборе непрерывных полос обзора, образуемых спутниками одной плоскости. По сути дела это были нефазированные системы – без согласования взаимных положений спутников в смежных плоскостях. В дальнейшем [5] было рассмотрено преимущество согласования взаимных положений спутников в смежных плоскостях с одним направлением движения спутников.

Значительным достижением теории спутниковых систем стали пионерские работы Г.В. Можяева [7-8] по кинематически правильным системам (КПС). Первая из этих работ была представлена на третьем всесоюзном конгрессе по теоретической и прикладной механике в 1968г. [7]. Независимо от Г.В. Можяева часть возможных кинематически правильных систем была предложена английским ученым Дж. Уолкером (J. Walker) [9-10]. Весьма принципиальна разница в способах построения этих систем у Г.В. Можяева и Дж. Уолкера. В первом случае он базируется на теории групп. В последнем случае, в большей степени, присутствует эмпирический подход и рассматривается узкое подмножество КПС. К сожалению, в дальнейшем в западной научной литературе

привился термин "Уолкеровские спутниковые системы" или "спутниковые системы типа Уолкеровских" ("Walker satellite constellations" или "Walker type constellations"). В такой ситуации более справедливым было именовать эти системы, по крайней мере, по фамилиям обоих авторов.

В 70-90 годы прошлого столетия методы проектирования СС непрерывного обзора получили дальнейшее развитие [11-36]. Обобщение основных результатов Г.В. Можаява было представлено в его монографии "Синтез орбитальных структур спутниковых систем" [11], вышедшей в 1989г. Предложенная Г.В. Можаявым идея кинематически правильных систем оказалась плодотворной не только для глобального непрерывного обзора Земли (или сферы), но и для других приложений. Следует отметить четырехтомный каталог систем одно-четырёхкратного непрерывного глобального обзора, подготовленный Б.П. Бырковым и его коллегами [12]. Этот каталог включал системы с числом спутников до 30.

Одной из ведущих американских исследовательских организаций в области космоса является "Аэроспейс Корпорейшен" ("The Aerospace Corporation"), которая в теории спутниковых систем занимает особое место, как в шестидесятые годы, так в настоящее время [24-32]. В 1980-х годах специалистами этой организации Л. Райдером (L. Rider) и У. Адамсом (W. Adams) были завершены разработки улучшенных методик и каталогов полярных фазированных и нефазированных систем глобального и зонального обзоров для кратностей обзоров от 1 до 4 [25, 28]. Последнее улучшение, которое удалось добиться У. Адамсу и Л. Райдеру, заключалось в оптимизации интерфейса между орбитальными плоскостями с противоположными направлениями движения спутников с учетом их фазирования. Методы построения нефазированных спутниковых систем с использованием полос обзора на наклонных орбитах (одно и многократный, зональный и глобальный обзор) были разработаны в 1986 г. Л. Райдером [26]. Нефазированные системы при сравнении с другими типами систем по традиционному критерию – минимальное количество спутников от высоты значительно уступают полярным фазированным и кинематически правильным системам. Томасом Лэнгом (T.Lang) в 1983 г. был создан эффективный вычислительный алгоритм выбора спутниковых систем в классе КПС, которые минимизируют времена перерывов [24]. Этот метод может использоваться как для систем непрерывного, так и периодического обзора. В дальнейшем (1987г.) он был им использован для построения КПС глобального одно-четырёхкратного обзора. В 1993 г. он опубликовал каталоги КПС глобального обзора (1-4 кратного) для числа спутников до 100 включительно [29]. Примерно в это же время такие системы были получены О.Е. Самусенко [21] – одним из учеников Б.П. Быркова. Они же были

представлены также в его кандидатской диссертации. Полные каталоги таких систем в электронном виде любезно присланные автору Т. Лэнгом и решения, полученные О.Е. Самусенко, естественно полностью совпали. Отметим, что пересечения результатов на этом не заканчиваются (о плагиате речь естественно не идет, поскольку результаты были получены в близкие периоды времени, это скорее недоступность работ). Например, в 1995 г. Т. Лэнгом и Ж. Майер (J. Mayer) [30] были представлены конфигурации из систем для глобального обзора, использующие разные наклонения орбит. Ранее (1989 г.) эти конфигурации были предложены в монографии Г.В. Можаяева [11].

В 1997-1999 г.г. автором был разработан новый класс спутниковых систем, который является обобщением известных полярных фазированных систем и потому названных околополярными спутниковыми системами. Полярные системы являются частным случаем этого класса. Методы выбора и описание этих систем были опубликованы в 1999 г. [33]. Интересно отметить, что рецензенты этой статьи в "Journal of Spacecraft and Rockets" (упоминавшиеся в обзоре Т. Лэнг и У. Адамс из "Аэроспейс Корпорейшен") уже после принятия статьи к печати сообщили автору, что сходные системы для некоторых фиксированных наклонений орбит были разработаны ими и представлены во внутреннем отчете за несколько лет до этого, но без обобщения их как нового класса систем. Как видим, соревнование по спутниковым системам продолжается.

Предпринимаются попытки синтеза спутниковых систем непрерывного обзора с использованием генетических алгоритмов [34-36]. Из работ самого последнего времени следует упомянуть работы по развитию КПС опубликованные В.К. Саульским [37-38] и Г.В. Можаяевым [39].

Как правило, спутниковые системы непрерывного обзора на круговых орбитах являются однородными, т.е. включают несколько плоскостей с одинаковыми наклонениями и высотами орбит. Неоднородные системы на круговых орбитах можно разделить на две группы: с различными наклонениями и с различными высотами (и наклонениями). Системы первой группы в классе КПС были представлены в уже упомянутой монографии Г.В. Можаяева [11] и в отчете [6]. Японскими специалистами разработаны методы построения СС, основанные на полосах обзора и использующие полярные и наклонные орбиты [23]. Методические работы по второй группе нам не известны, но имеются патенты, описывающие такие системы.

Традиционным способом сравнения СС является определение зависимости минимально необходимого количества спутников от высоты орбиты для различных классов систем. Данные зависимости для КПС [7-12, 21, 27] и околополярных СС [33] показаны на рис. 1 и 2 соответственно для случаев однократного и двукратного глобального

непрерывного обзора Земли. При этом кинематически правильные СС представлены моноструктурами 1 типа (дельта-системами).

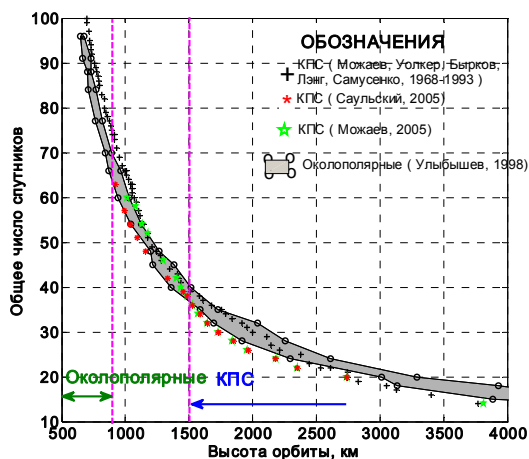


Рис. 1 Однократный обзор

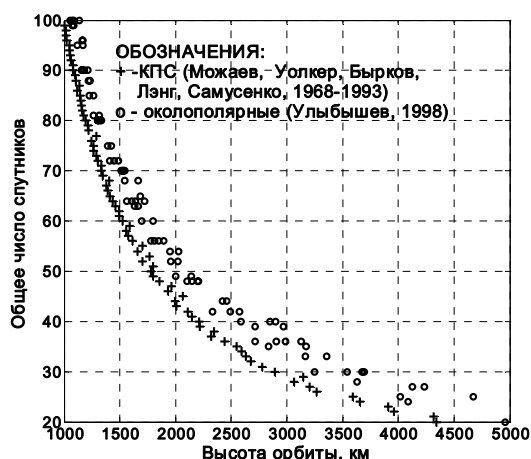


Рис. 2 Двухкратном обзор

Из приведенных результатов видно, что при однократном глобальном обзоре Земли и N менее ~ 65 спутников КПС по своим характеристикам лучше околополярных систем, а при $N > 65$ лучшими являются околополярные системы. Для двукратного глобального обзора КПС оказываются лучшими для всех значений $N \leq 100$.

Результаты Г.В. Можая [11] и Балларда [16] показывают, что минимальным количеством спутников n -кратного непрерывного глобального обзора на круговых орбитах является $N \geq 2n + 3$.

1.2. СС на круговых орбитах – межспутниковая связь, обзор географических областей и надгоризонтальный обзор

Указанные выше работы были связаны, в основном, с требованиями непрерывного обзора точечного наблюдателя на поверхности Земли. Вместе с тем, требования со стороны реальных космических систем, как правило, шире. В первую очередь следует выделить СС, обеспечивающие определенные условия по межспутниковой связи и связи с использованием сетей земных станций (ЗС). Идея кинематически правильных систем Г.В. Можая была успешно использована его учеником А.А. Гутеневым для синтеза систем с непрерывной межспутниковой связью [41]. Свойства таких систем исследовались Ш.И. Галиевым и В.И. Заботиным [42]. Упомянутые нами Т. Лэнг и Б. Адамс выполнили сравнительный анализ условий межспутниковой связи (учет ширины диаграммы направленности, угловая скорость поворота линии визирования и т.д.) для кинематически

правильных и полярных систем [32]. При проектировании СС связанных со спутниковой связью приходится учитывать много факторов, т.е. проблема является многокритериальной [43].

Другой разновидностью СС непрерывного обзора являются системы обеспечивающие непрерывный обзор уже целой географической области одним из спутников. Это означает, что в любой момент времени с одного и того же спутника наблюдаемы все точки этой области. И обратно, все наблюдатели, находящиеся внутри этой области, всегда видят, как минимум, один и тот же спутник. Методы проектирования подобных систем для круговых орбит представлены в [47]. Краткое изложение этих методов и пример СС непрерывного обзора территории США приводятся в докладе.

Особым классом являются СС непрерывного надгоризонтального обзора. Единственная известная нам публикация методического плана на эту тему - статья Дж. Хансона (J. Hanson) с А. Линденом (A. Linden) [48], где рассматривались методы выбора кинематически правильных систем, а также систем, получаемых подбором сфазированных полос обзора.

1.3. СС на эллиптических орбитах

В спутниковых системах, ориентированных на обеспечение обзора среднеширотных и приполярных районов одного из земных полушариев, более предпочтительным может быть использование СС на эллиптических орбитах, обеспечивающих непрерывный обзор соответствующих широтных поясов или обширных географических областей. Первой практической реализацией подобных систем был космический аппарат (КА) «Молния-1» созданный в ЦКБЭМ (в настоящее время ракетно-космическая Корпорация «Энергия» им. С.П. Королева) в 1964 г. [49] с периодом орбиты $T \sim 12$ часов, наклонением $i = 63.4^\circ$, высотой перигея $h_p \sim 500$ км и аргументом перигея $\omega_p \sim -270^\circ$. Характерным свойством таких систем является использование критического наклонения ($i = 63.4^\circ$ или $i = 116.6^\circ$) и размещение апогея орбиты в земном полушарии с областью обзора. Критическое наклонение обеспечивает стабильное положение линии апсид по отношению к главному возмущающему члену связанному с нецентральностью гравитационного поля Земли – ее полярным сжатием. Одной из основных трудностей проектирования структур СС на эллиптических орбитах, в отличие от круговых орбит, является необходимость учета изменяющегося по времени мгновенного поля обзора КА, зависящего от высоты его полета.

Среди СС на орбитах типа «Молнии» были разработаны так называемые однотрассовые системы (или одномаршрутные) [50-51], которые имеют одинаковые трассы на поверхности Земли (т.е. одинаковые параметры орбит и гринвичские долготы восходящих узлов).

Цикл работ по проектированию СС непрерывного обзора на эллиптических орбитах был выполнен Дж. Дреймом и его коллегами [52-59]. Часть этих СС с наклонениями отличными от нулевого или критического [51-53], использовать на практике затруднительно в силу высоких затрат топлива на поддержание положения линии апсид. Им получена оценка минимальное количества спутников для n -кратного непрерывного глобального обзора на эллиптических орбитах - $N \geq 2n+2$ [54]. В последние годы были предложены интересные СС на орбитах с критическим наклонением, у которых в отличие от орбит типа «Молнии» перигеи смещены и трассы образуют особые положения (они образно названы «Cobra» и «Teardrop»)[58-59].

Рассматривались также СС на эллиптических орбитах с различными комбинациями положений перигеев орбит [18] и на орбитах с полярным наклонением [60]. Метод выбора конфигураций СС на основе анализа расширяющейся полосы обзора образуемых КА размещенными в одной орбитальной плоскости эллиптической орбиты предложен в [61]. Следует отметить работу [62], где на основе идей Дж. Уолкера [9-10] определяется размер наибольшего сферического сегмента построенного по трем подспутниковым точкам. Получены различные СС для непрерывного глобального и обзора северного полушария, в т.ч. и для орбит с критическим наклонением. Цикл исследований связан с так называемыми «цветочными созвездиями» («Flower Constellations» см. например [63], где приведена соответствующая библиография). В некотором смысле эти системы частным видом уже упоминавшихся одномаршрутных СС [50-51].

Проблемы анализа сетей связи ЗС и межспутниковой связи для СС на эллиптических орбитах рассматривались в ряде работ [64-74]. Параметры эллиптических орбит для СС могут выбираться с учетом локальной стационарности – равенства нулю мгновенной скорости смещения относительно Земли подспутниковой точки в апогее орбиты [73], что использовалось для оптимального выбора системы спутникового вещания [74].

Непрерывный обзор географических областей в виде широтных поясов ограниченных меридианами некоторого интервала долгот исследовались в [50]. В работе автора [75] рассмотрена более общая постановка непрерывного обзора, подразумевающая представление произвольной географической области обзора в виде некоторого набора

граничных и внутренних точек и разработаны новые методы проектирования структур СС на эллиптических орбитах на основе двумерных отображений условий видимости и движения СС для непрерывного зонального обзора и обзора географических областей на орбитах типа «Молнии»(периодами ~4, 12 и 24 часов). Краткое изложение этих методов и некоторые примеры будут представлены ниже.

В заключении этого раздела отметим, что вопросы проектирования СС являются составной частью современных монографий по астродинамике [76-78], имеются интересные обзоры развития теории спутниковых систем [79-80]. Очевидным развитием СС непрерывного обзора являются гибридные СС[81-82] использующие как круговые , так и эллиптические. Теория этих систем только зарождается. В обзоре сознательно не упоминаются работы по проектированию СС периодического обзора, поскольку это большая тема требующая специального рассмотрения.

1.4. Схематическое дерево развития методов проектирования СС

На рис. 3 представлено схематическое дерево развития методов проектирования спутниковых систем обзора. Все “фрукты” на этом дереве были указаны выше.

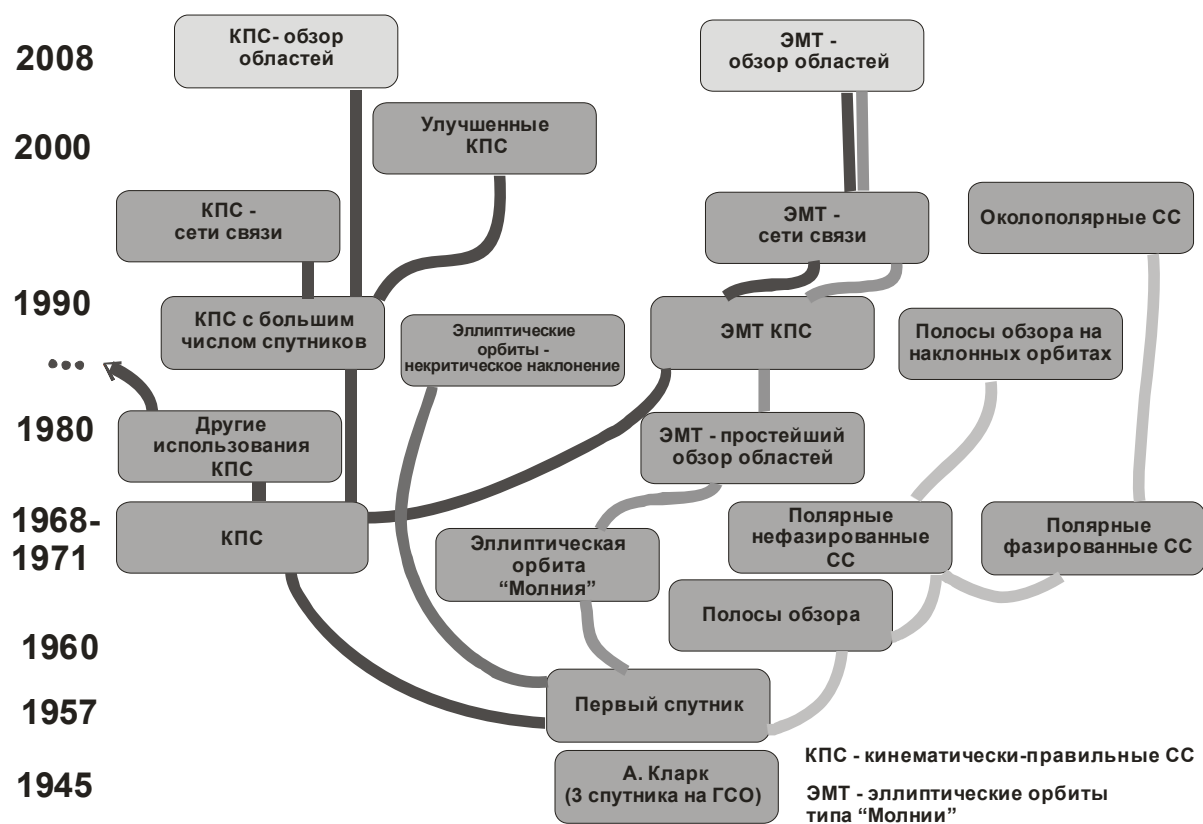




Рис. 3 Дерево СС

Рис 3. О классификации СС непрерывного обзора

Краткий обзор вышеуказанных работ позволяет выполнить некоторую классификацию систем на стыке понятий "тип системы" и "тип непрерывного обзора". Эта классификация не претендует на какую-то глобальную полноту, а, как мы полагаем, позволяет лучше уяснить взаимосвязь различных типов систем и, возможно, указать некоторые направления дальнейших исследований. Будут рассмотрены только однородные системы, т.е. системы построенные из нескольких орбитальных плоскостей с одинаковым числом спутников в каждой на орбитах с одинаковыми наклонениями и формой (т.е. высотами для круговых орбит; эксцентриситетом и периодом для эллиптических орбит).

Классификация СС представлена в табл.1, где выделены возможные типы систем и обзора. Таблица имеет три части. В первой указан тип орбиты - круговые или эллиптические, во второй основные свойства учитываемые при построении СС и указан их тип. На наш взгляд основными свойствами являются симметрия, фазирование положений спутников в смежных плоскостях (наличие или отсутствие), ограничения по наклонению орбиты и повторяемости трассы в плане предпочтений (включая фиксированные значения) или напротив в отсутствии таковых. В третьей части указаны возможные виды обзоров. В пересекающихся клетках таблицы указаны ссылки на источники, в которых представлены методики и/или приведены примеры для соответствующих СС в виде номеров подсписков, которые приводятся ниже (в форме номеров из списка литературы). Число работ по некоторым позициям достаточно велико, поэтому, по возможности, будут приведены ссылки на более доступные работы и работы, наиболее полно отражающие данную позицию. Пустые клетки означают возможные СС по которым автору не удалось найти соответствующих работ (видимо некоторые из этих систем не имеют практического смысла).

Таблица 1 Возможная классификация однородных систем непрерывного обзора

| Тип орбиты | Свойства | | | | Тип СС | Виды непрерывного обзора | | | | | |
|---|-----------|--------------|----------------|----------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------|---------|--------|-----------------|-----------------|
| | Симметрия | Фази-рование | Накло-нение | Повтор. трассы | | Обзор Земли (сферы) | | | | Межспутн. связь | Надгориз. обзор |
| | | | | | | Точечный | | Области | | | |
| | | | | | | Глобальный | Зональный | Частный | Полный | | |
| Круговые  | + | + | | | КПС | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 |
| | | - | | | Нефазируемые на наклонных орбитах | 5 | 5 | | | | |
| | | + | Около-полярные | | Околополярные | 6 | 6 | | | 6 Иридиум | |
| Эллипти-ческие  | | | Крити-ческое | | КПС «МОЛНИЯ» многотрассовые | X | 7 | | | 8 | |
| | | + | Крити-ческос | + | КПС «МОЛНИЯ» однотрассовые | X | X | 9 | 9 | | |
| | | + | | | СС Дрейма | 10 | 10 | | | | |

- обязательность
 - возможность
 - недопустимость

+ - наличие

- - отсутствие

N - номер подписка

Подписки:

- 1) круговые орбиты: 1-[7-12, 17, 21, 24, 27, 29, 31, 37-39]; 2-[47]; 3-[40-46]; 4-[48]; 5-[13, 25, 28, 33];
- 2) эллиптические орбиты: 6-[];

3. Новые методы – использование двумерных отображений

Дальнейшее изложение основано на работах автора [47, 75]

3.1. Геометрические предпосылки

Основные допущения: 1) Земля рассматривается как сфера; 2) все спутники в системе имеют одну и ту же высоту с одинаковым количеством спутников в каждой плоскости и 3) все орбитальные плоскости имеют одинаковое наклонение. Рис. 4 показывает основные параметры связанные с видимостью спутника наблюдателем на поверхности Земли.

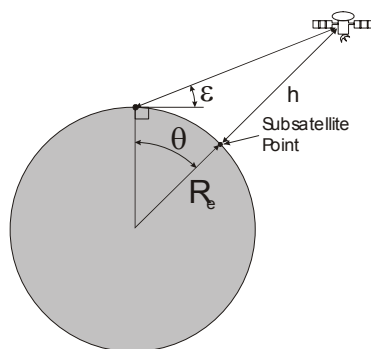


Рис. 4 Геометрия видимости

Спутник находится на высоте h и проекция его поля обзора на поверхность Земли определяет сферический сегмент с углом обзора Θ . Хорошо известное соотношение между углом обзора Θ , высотой орбиты h и углом возвышения ε имеет вид:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos \varepsilon \right) - \varepsilon \quad (1)$$

Отметим, что размер сферического сегмента зависит только от высоты орбиты спутника (при фиксированном α).

3.2. Двумерные отображения требований по обзору.

Определим двумерное пространство, связанное со спутниковой системой следующим образом. Ось абсцисс – инерциальная долгота восходящего узла орбиты Ω (используют также термин прямое восхождение восходящего узла), а ось ординат – время полета t (или аргумент широты $u = \omega t$ круговых орбит). Предположим, что орбитальные элементы – наклонение i , период T , а для эллиптических орбит эксцентриситет e и аргумент перигея ωl заданы. Считаем, что требования по характеристикам непрерывного обзора известны в виде некоторой функциональной зависимости. Без потери общности предположим, что эта зависимость имеет вид $f(\Omega, t) \geq 0$. Она описывает все точки (т.е. некоторую область) в этом двумерном пространстве, для которых выполняются требования по непрерывному обзору по отношению к одиночному КА. Отметим, что начало отсчета по Ω для последующего анализа несущественно, а значение имеют только относительные размеры области. Далее эту область будем называть целевой.

Простейшим случаем является видимость спутником какой-то определенной точки на поверхности Земли. На рис.5 показаны примеры таких отображений для точек с разными географическими широтами на интервале одного орбитального периода для КА на круговой орбите. На следующем витке все отображения будут смещены вправо на угол $\omega_e \times P_n$ (где ω_e – угловая скорость вращения Земли и P_n орбитальный период) и т.д. на следующих витках. С геометрической точки зрения отображения могут быть выпуклыми или невыпуклыми, одно или многосвязными. Для вычислительных целей функция обзора представляется как полигон граничных точек. Примеры таких областей для эллиптической орбиты типа МОЛНИИ с периодом $T \approx 4$ час приведены на рис. 6 для видимости КА наблюдателем на различных широтах. Так для наблюдателя на экваторе (см. рис. 6а) это будет двухсвязная область – одна часть соответствует видимости на восходящей ветви витка, а вторая на нисходящей ветви. При увеличении широты наблюдателя они расширяются в основном вдоль оси абсцисс и сливаются в односвязную

область (см. рис. 6б-в). Для высоких широт видимость КА наблюдателем возможна при произвольном значении Ω (см. рис. 6г).

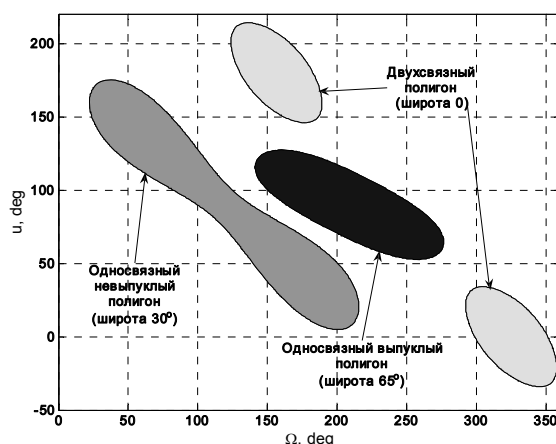


Рис. 5. Примеры полигонов для простейшего обзора (круговая орбита $h = 1400\text{км}$, $i = 52^\circ$, $\varepsilon = 10^\circ$)

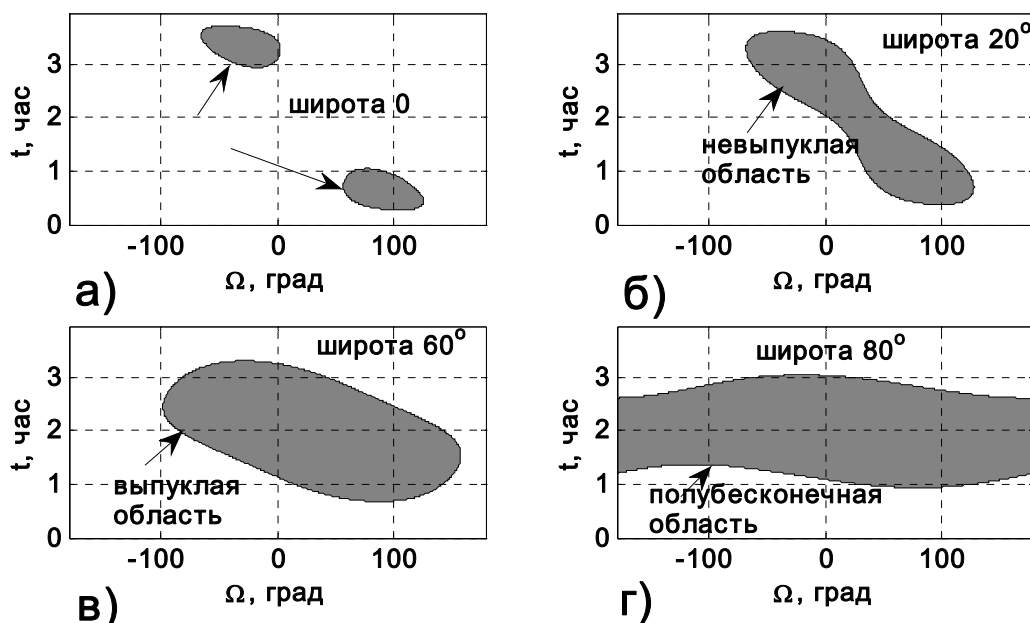


Рис. 6. Примеры полигонов для простейшего обзора (эллиптическая орбита типа МОЛНИИ $T \approx 4$ час, $i = 63.4^\circ$, $\varepsilon = 25^\circ$)

В качестве первого примера комплексного обзора рассмотрим полный обзор географической области на поверхности Земли одним спутником, означая, что область полностью находится внутри мгновенного поля обзора этого спутника и видна под некоторым минимальным углом возвышения в этот момент времени. Такой случай может быть назван как полный обзор области (рис. 7а). Следующий случай – обзор части области, т.е. только какая-то часть области находится внутри мгновенного поля обзора спутника (рис. 7б).

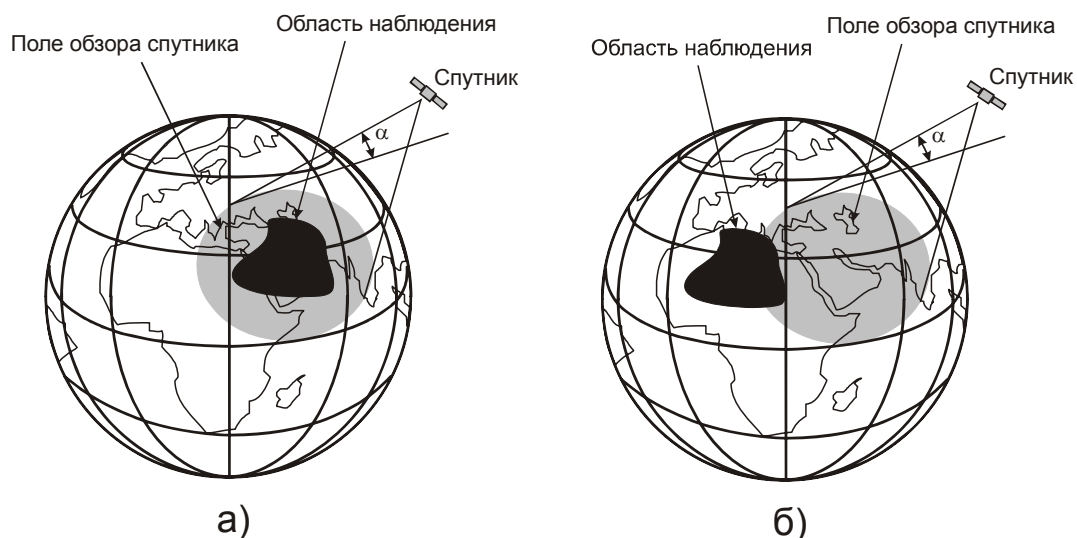


Рис. 7 Геометрия обзора областей

Каждая область обзора может быть представлена дискретным множеством внутренних и граничных точек. Для полного обзора области функция обзора $f(\Omega, u)$ представляет пересечение всех полигонов для этих точек (рис. 8а), а для обзора части области объединение этих полигонов (рис. 8б).

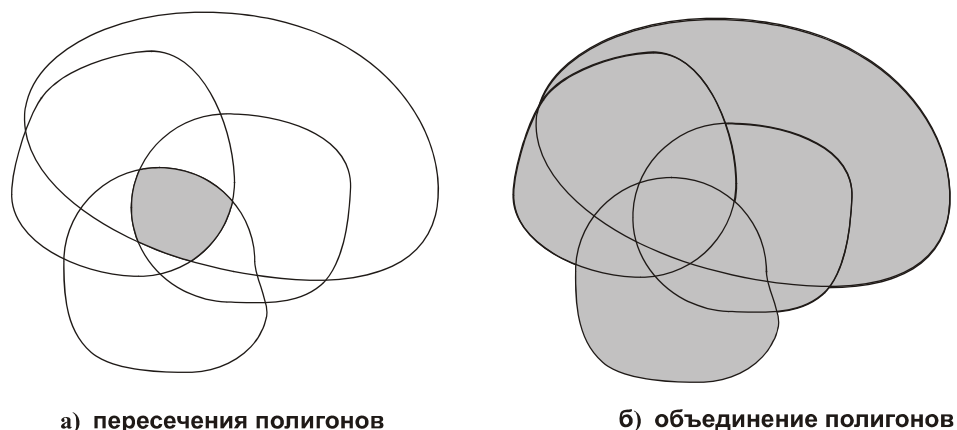


Рис. 8 Операции с полигонами

Далее предполагается, что имеется отображение условий обзора в виде некоторой целевой области. Для вычислительных целей, любые области можно представлять в виде полигонов граничных точек и для построения целевых функций связанных с их пересечениями использовать методы вычислительной геометрии [83].

3.3. Двумерные отображения для спутниковых систем

В предложенном двумерном пространстве отображение орбитального движения КА на интервале орбитального периода представляет прямую линию параллельную оси ординат. Если рассматривать существенно более длительные интервалы времени, то может потребоваться учет прецессии инерциальной долготы восходящего узла. В таком

случае траектория также будет прямой линией наклоненной к оси ординат с малым углом, зависящим от скорости прецессии. Последующий анализ будет ограничиваться временными интервалами, не превышающими нескольких орбитальных периодов, поэтому, прецессия долготы восходящего узла орбиты учитываться не будет.

Дальнейшая оптимизация систем будет ограничена классом КПС, которые используют симметричную конфигурацию круговых орбит с одинаковыми наклонениями и высотами. Будет использовано стандартное обозначение или индекс системы [9-10] - N/P/F. Здесь N – общее количество спутников в системе, P – число орбитальных плоскостей равномерно размещенных по экватору. В каждой орбитальной плоскости равномерно размещается по N/P спутников. Целочисленный параметр F описывает фазовый сдвиг положений спутников в смежных плоскостях, которые смещены по фазе относительно друг друга на угол $F(2\pi/N)$. Очевидно, что отображение движения кинематически правильной спутниковой системы в двумерном пространстве представляет из себя равномерно движущуюся параллельно оси ординат решетку с одинаковыми ячейками. Если фазовый сдвиг в СС несущественен, то такие СС будут обозначаться как N/P.

Для эллиптических орбит будут также рассматриваться кинематически правильные СС, которые являются очевидным расширением КПС на круговых орбитах [7-11]. Все спутники в таких системах размещены на одних и тех же орбитах в P орбитальных плоскостях по S спутников в каждой. Долготы восходящих узлов P плоскостей равномерно распределены по экватору, а S спутников равномерно разнесены по времени прохождения перигея, со сдвигом T/S, где T – орбитальный период.

Отметим существенное отличие традиционных отображений для зон видимости (по отзывам коллег, их автором являлся П.Е. Эльясберг), где одной из координат является долгота восходящего узла во вращающейся гринвичской системе координат. Поскольку структура СС определяется, как правило, в инерциальном пространстве, отобразить движение СС в пространстве связанном с вращающейся Землей весьма затруднительно. В предлагаемом же отображении с инерциальной долготой восходящего узла, движение СС имеет, видимо, самый простейший вид – равномерно движущаяся решетка.

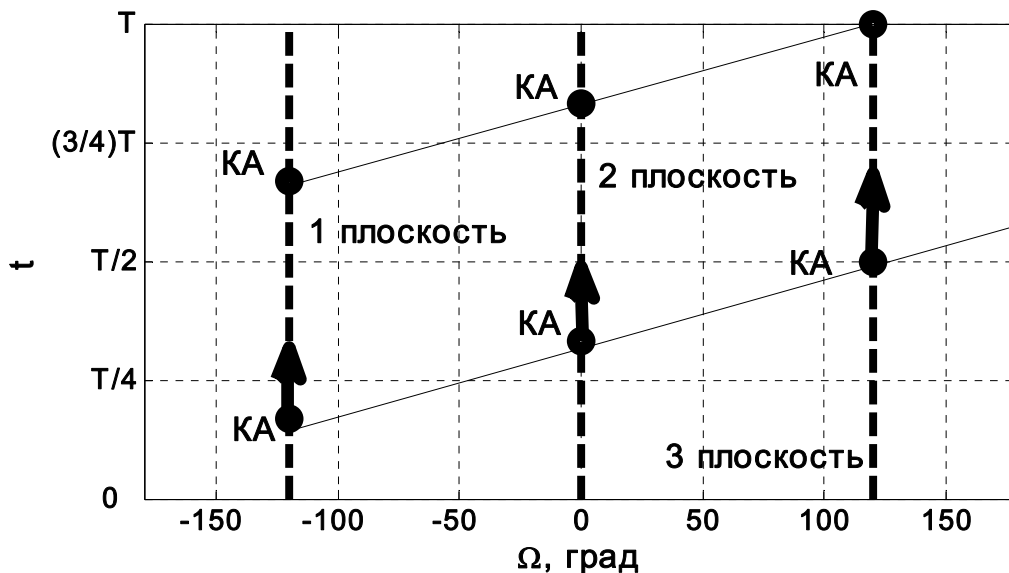


Рис. 9 Пример отображения спутниковой системы

3.4. Выбор конфигураций спутниковых систем

Для выполнения требований по обзору в любой момент времени как минимум один узел решетки должен принадлежать полигону. Решетка должна также удовлетворять целочисленным ограничениям для числа орбитальных плоскостей и числа спутников в плоскости. Оптимальная конфигурация спутниковой системы соответствует максимально разреженной решетке. Этот метод подходит для непрерывного и периодического обзоров. В последнем случае принадлежность узла полигону должна выполняться с некоторым временем перерыва. Предположим, что отображение $f(\Omega, \tau)$ является выпуклым полигоном. Очевидно, что все ячейки решетки являются параллелограммами со сторонами равными $2\pi/S$ (параллельно оси абсцисс) и со сторонами сдвинутыми на $2\pi/P$ вдоль оси ординат под некоторым углом наклона $\Delta\tau$ (кратным $2\pi/T$). Отсюда следует, что можно рассматривать только одну ячейку. Очевидно, что оптимальная система с минимальным количеством спутников соответствует максимальному по площади параллелограмму, который может быть размещен (или вписан в предельном случае) в этом полигоне (рис. 10). Доказательство очевидно и имеет наглядную интерпретацию. Если в целевой области отображающей требования по обзору в любой момент времени находится один из узлов решетки, представляющей некоторую конфигурацию CC , то она является допустимой. Это условие должно сохраняться при любом сдвиге решетки по любой из осей координат.

Пусть имеется некоторая конфигурация CC из P орбитальных плоскостей по S спутников в каждой. Она является допустимой, если в целевой области существует такой

диапазон долгот смежных орбитальных плоскостей $\Delta\Omega \geq 2\pi/P$, в котором минимальная разница $(t_{ВЫХ}-t_{ВХ}) \geq T/S$ (рис.9). Здесь существенным являются не абсолютные значения долгот восходящих узлов Ω , а их относительный сдвиг, поскольку в процессе длительной эволюции орбит КА их инерциальные долготы узлов будут прецессировать. При этом предполагается, что скорость такого изменения будет одинаковой для всех КА системы. На рис. 10 показан пример отображения условий видимости КА на эллиптической орбите типа МОЛНИИ с периодом $T \approx 4$ час для наблюдателя на широте $\varphi = 60^\circ$ с.ш. ($\alpha \geq 25^\circ$) и максимальный по площади параллелограмм, вписанный в целевую область для двух орбитальных плоскостей. Пунктирами показаны границы параллелограммов, соответствующих различным значениям числа спутников в одной плоскости $S = 2, 3$ и 4 . Наилучшим решением в данном случае будет СС включающая две орбитальные плоскости по 3 КА в каждой. Очевидно, что максимально достижимая в какой-то момент времени кратность обзора в такой системе будет равна 4. При этом фазовый сдвиг в СС должен иметь определенное значение. Другим типом решения будут СС с тем же количеством КА и орбитальных плоскостей, но с произвольным фазовым сдвигом, т.е. нефазированные. При этом максимально возможная кратность обзора здесь будет, как правило, ниже и может быть равна 3. Географические характеристики обзора для этих типов решений будут различаться, однако оба вида СС (фазированная и нефазированная) будут выполнять целевые требования по обзору.

Отображение целевой области можно трактовать более широко – как отображение некоторых целевых условий предъявляемых к спутниковой системе и необязательно связанных с обзором земной поверхности. Соответствующие алгоритмы, вычислительные особенности и примеры приведены в [47, 75]. Описываемые геометрические задачи связаны с двумерным пространством, поэтому имеются широкие возможности для их компьютерной визуализации и разработки интерактивных алгоритмов.

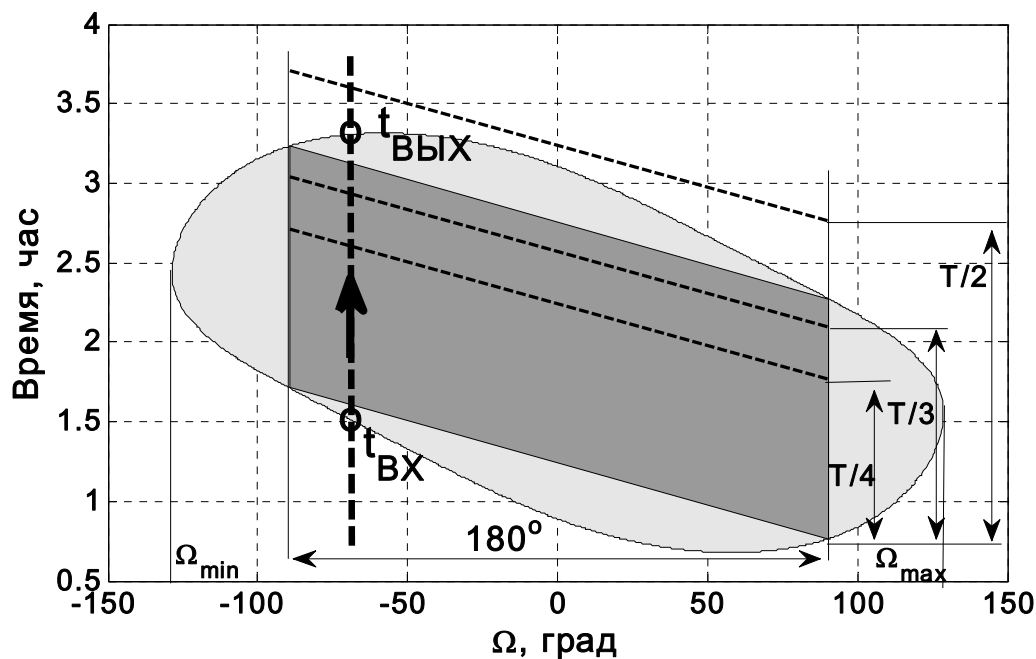


Рис. 10 Выбор конфигурации спутниковой системы

4. Примеры проектирования систем непрерывного обзора

4.1. Круговые орбиты - непрерывный обзор территории США одним спутником

В качестве примера полного обзора географической области рассматривается непрерывный обзор территории США (без Аляски, Гавайских и других островов, рис. 11)[47]. Это означает, что в любой момент времени должен быть, по крайней мере, один спутник в системе с мгновенным полем обзора, включающим всю область. Или другими словами в любое время как минимум один спутник виден со всех точек территории США. Для этого случая функция обзора может быть рассчитана на основе выпуклой оболочки для граничных точек территории США. Выпуклая оболочка это наименьшее выпуклое множество, включающее эти точки (см. рис. 11).

Рассматриваются орбитальные элементы близкие к спутниковой системе ICO: круговая орбита с высотой $h=10300$ км и наклоном $i=45^\circ$. Отображения полей обзора для граничных точек и их пересечения показаны на рис. 12.

Соответствующая спутниковая система имеет индекс $T/P/F = 15/3/2$. Численное моделирование показывает, что для такой орбиты максимально возможное время видимости всей области одним спутником может составлять ~ 93 мин (для $\varepsilon=10^\circ$). Статистические характеристики обзора для такой спутниковой системы представлены в табл.2.

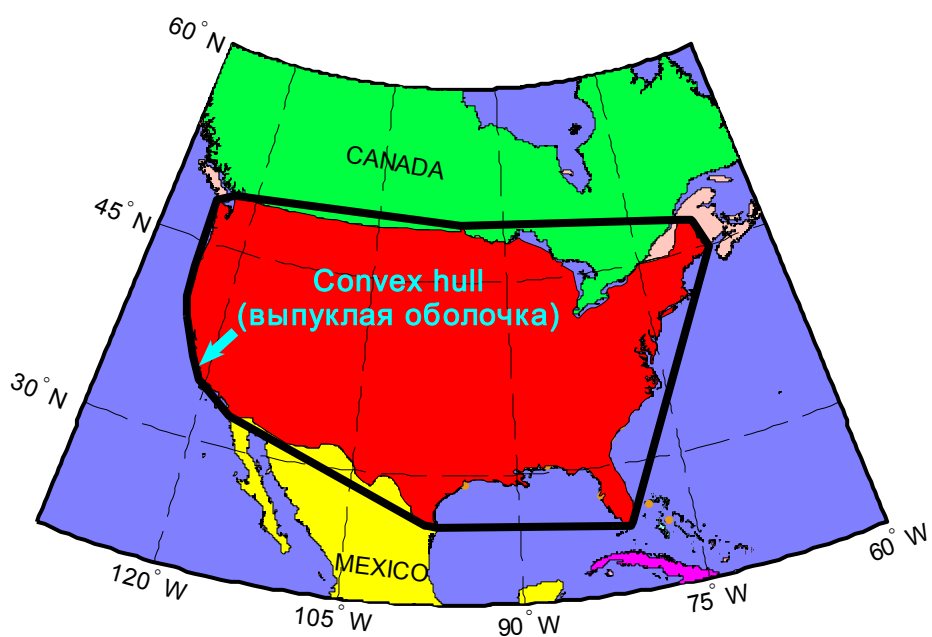


Рис. 11 Выпуклая оболочка для территории США

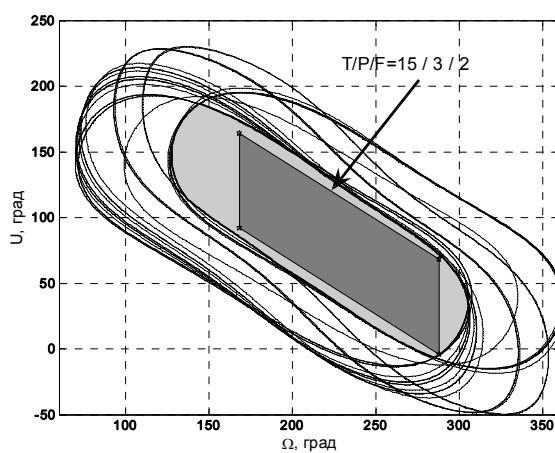


Рис. 12 Решение для обзора территории США

Таблица 2. Результаты моделирования для территории США

| Кратность обзора | Процентная доля | Время наблюдения, мин | |
|---------------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| | | Среднее | Максимальное |
| 1 | 33 | 24.8 | 86.2 |
| 2 | 65 | 30.5 | 73.0 |
| 3 | 2 | 2.2 | 4.9 |

4.2. Эллиптические орбиты МОЛНИЯ-зональный обзор

Важной особенностью эллиптических орбит МОЛНИЯ с аргументом перигея $\omega = -90^\circ$ является симметрия относительно плоскости проходящей через ось вращения Земли и линию апсид. Поэтому высота КА и, соответственно, мгновенное поле обзора на одной и той же широте будут одинаковыми как для восходящей, так и для нисходящей ветвей орбиты. Это позволяет использовать для зонального непрерывного обзора диапазона условия для различных географических широт вне зависимости от географической долготы. Для определения множества допустимых конфигураций СС в некотором географическом диапазоне широт при различных минимальных углах возвышения, необходимо рассмотреть возможные сочетания числа орбитальных плоскостей и спутников в них и, для каждой конкретного значения широты наблюдателя и угла возвышения, определить допустимые конфигурации. Далее среди них выбирается оптимальная по общему числу спутников.

Для непрерывного однократного обзора широтного слоя $\varphi = 40^\circ - 90^\circ$ с.ш., включающего территорию России получено множество возможных конфигураций спутниковых систем как функции географических широт обзора и гарантированных углов возвышения для орбиты МОЛНИЯ, которое представлено на рис. 13 с указанием их индексов (N/P). Области с одинаковым минимальным количеством спутников окрашены одним цветом. Для условий видимости отображаемых в виде полубесконечной области СС может иметь одну орбитальную плоскость (или несколько плоскостей со сдвигом положений спутников в ней равном T/N). Например, для СС включающих 3 КА этими конфигурациями могут быть кинематически правильные СС с индексами 3/1/1, 3/2/1 и 3/3/1 или вообще СС с произвольным распределением орбитальных плоскостей по экватору, но с необходимым фазовым сдвигом положений КА в этих плоскостях равным T/3. Имеются подобласти, в которых допустимы по две конфигурации СС (на рис. 12 они отмечены маркерами «+»). Эти конфигурации имеют индексы соответственно 4/1, 6/3 и 8/4.

Отметим, что предложенный метод обеспечивает выбор конфигураций СС с гарантированными характеристиками непрерывного обзора широтных поясов, т.е. при любой географической долготе на соответствующем меридиане. Фактическое распределение гарантированных углов возвышения с учетом прохождения трасс, разумеется, будет отличаться, но углы возвышения будут не ниже гарантированных. На рис. 14 представлен пример моделирования характеристик обзора СС на орбите «Молния» с индексом 6/2/1 в виде географического распределения гарантированных углов

возвышения. Если стабильность трасс КА будет поддерживаться, то эти географические характеристики обзора будут сохраняться в долговременном масштабе.

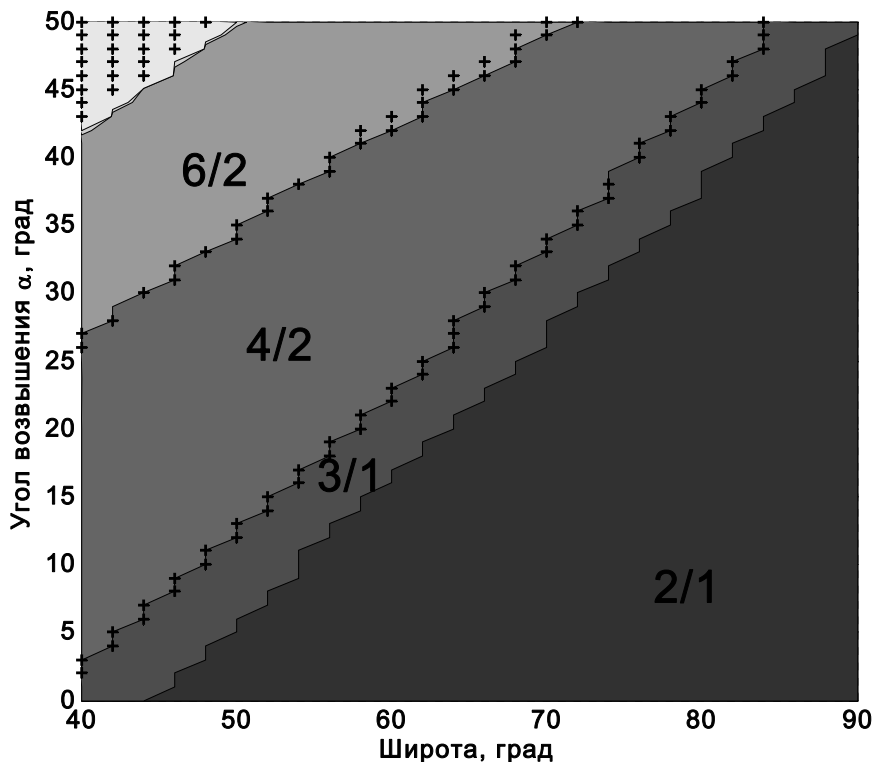


Рис. 13 Системы зонального обзора для орбиты МОЛНИЯ

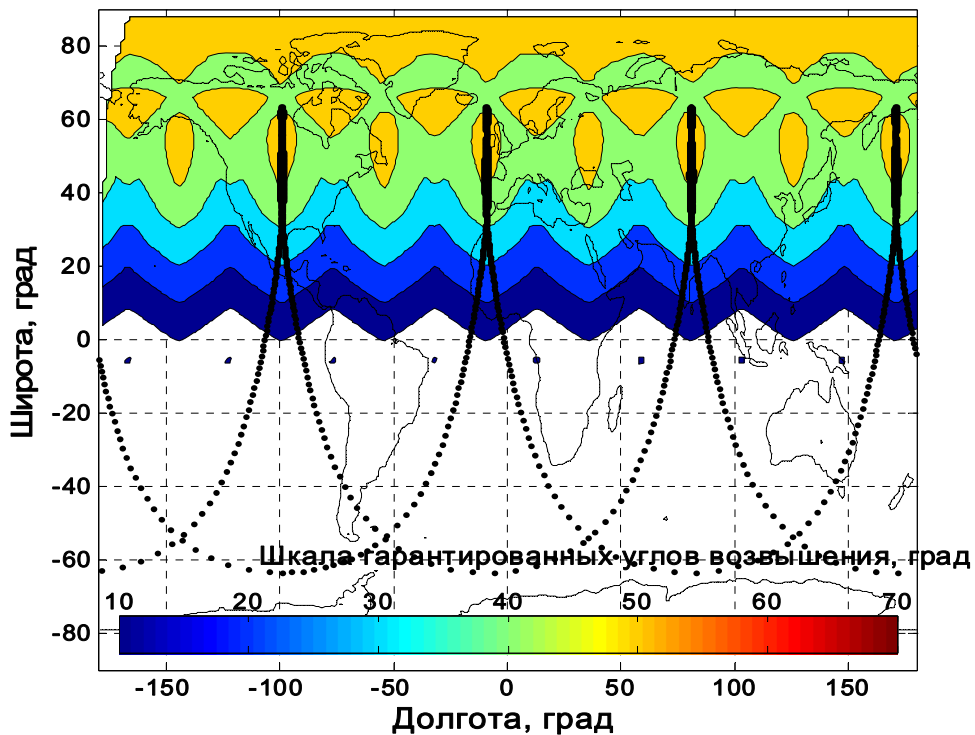


Рис. 14 Характеристики обзора для СС на орбите МОЛНИЯ

Примеры СС на эллиптических орбитах типа МОЛНИИ с орбитальными периодами 4 и 24 час. приведены в [75]. В целом представленные результаты в виде множеств систем позволяют выбрать конфигурацию СС непрерывного обзора в зависимости от требуемых широтного диапазона и гарантированных углов возвышения.

4.3. Однотрассовые системы непрерывного обзора территории России на эллиптических орбитах типа «МОЛНИЯ»

Одномаршрутными называют СС имеющими одну и ту же трассу на поверхности Земли [50-51]. При сохранении стабильности трассы всех КА характеристики непрерывного обзора для различных географических областей будут зависеть от прохождения трассы. Для какой-то определенной географической области может быть выбрано оптимальное прохождение трассы.

Рассмотрим выбор СС (с углом возвышения $\alpha \geq 30^\circ$) на орбите «Молния» для обзора территории России, представленной конечным набором граничных и внутренних точек (рис. 15). Наблюдаемая область заштрихована.

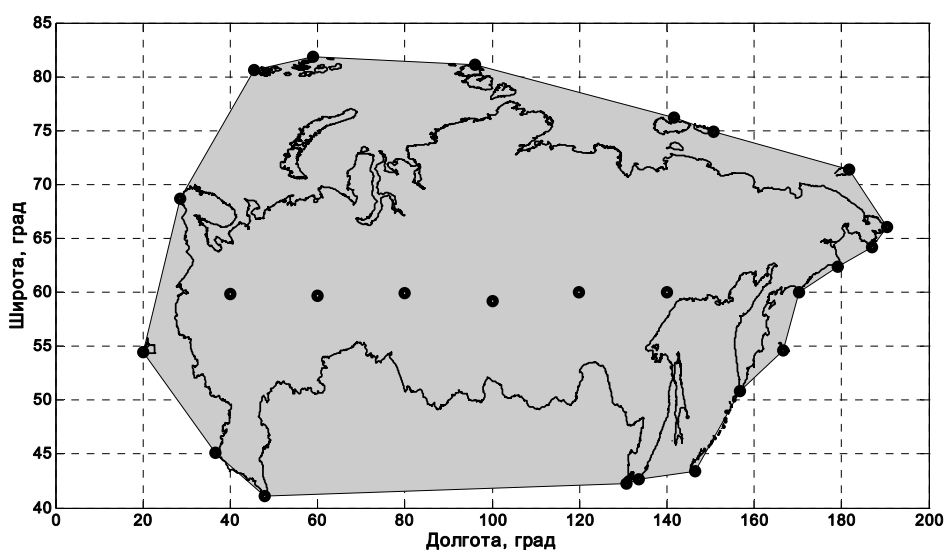


Рис. 15 Географическая область обзора

Для построения отображения целевой функции необходимо получить отображения условий видимости для некоторого набора точек, представляющих географическую область наблюдения. На рис. 16 показаны эти отображения и целевая область, которая подразумевает видимость всей территории России одним КА (или обратно – все наблюдатели, находящиеся на этой территории в любой момент времени видят по крайней мере один и тот же КА). Максимальная продолжительность видимости всей территории при соответствующем выборе трассы составляет более чем 8 часов. Отсюда следует, что

три КА на одной географической трассе со сдвигом времени пролета одной и той же точки орбиты (например, восходящего узла) равном 8 часам обеспечат непрерывную видимость всей территории России. В инерциальном пространстве долготы восходящих узлов этих КА должны быть смещены относительно друг друга на 120° . Двумерные отображения такой спутниковой системы и целевых областей в одной шкале времени показаны на рис. 17. Система будет иметь пересечения зон видимости смежных спутников. Структура такой системы имеет индекс $3/3/2$.

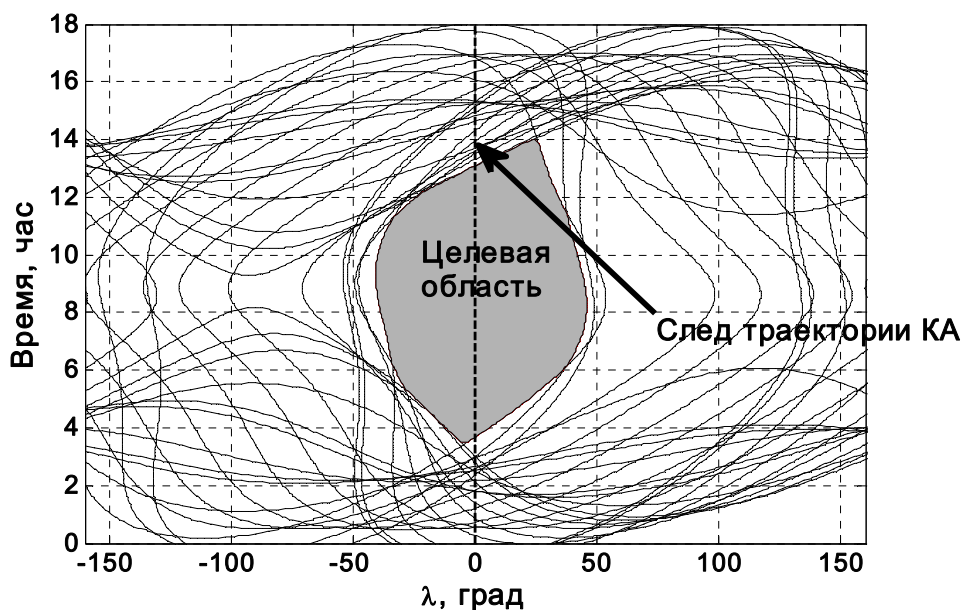


Рис. 16 Отображение требований по обзору

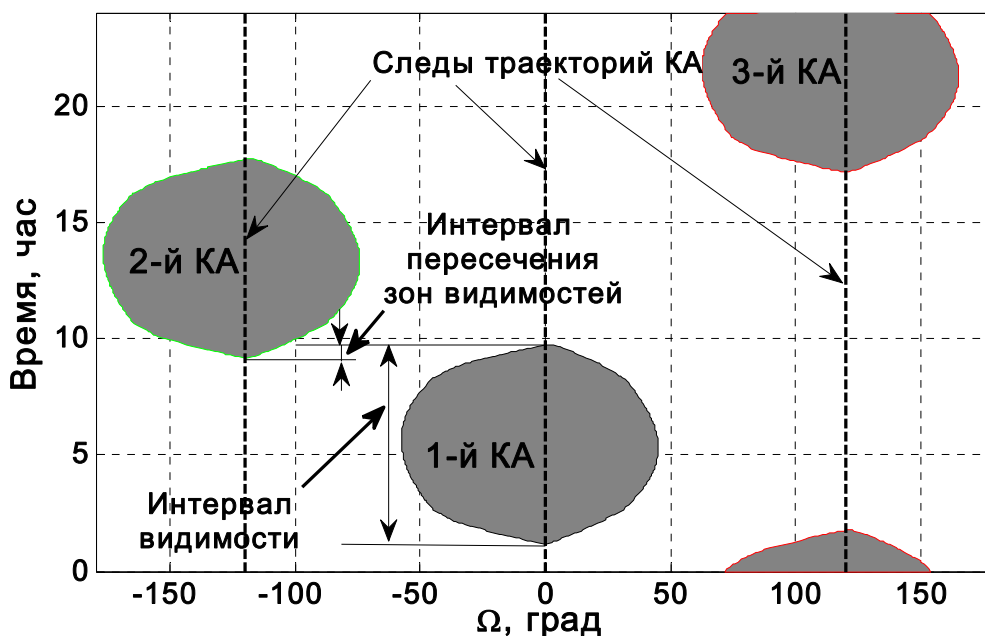


Рис. 17 Отображение однотрассовой системы

На рис. 18 представлены результаты моделирования характеристик обзора этой в виде географического распределения гарантированных углов возвышения.

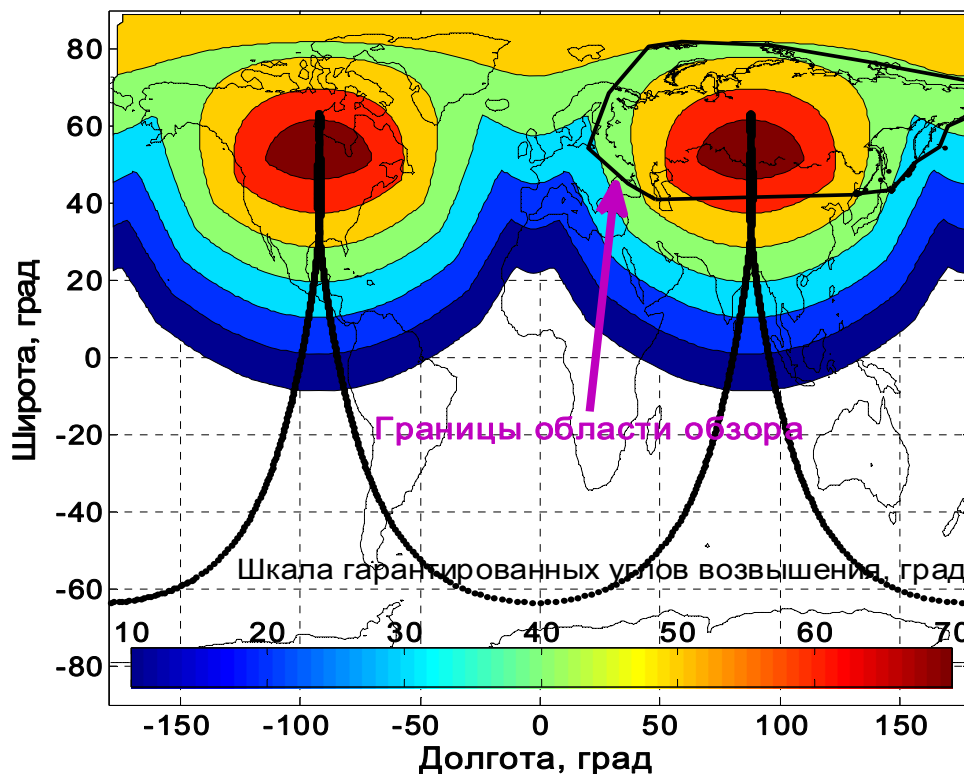


Рис. 18 Характеристики обзора односпутниковой СС на орбите МОЛНИЯ

Подобным образом может быть построена двухспутниковая СС непрерывного обзора на орбите имеющей период ~ 24 часов и высоту перигея (~ 19000 км) вне радиационных поясов Земли[75]. Пример характеристик такой системы показан на рис. 19.

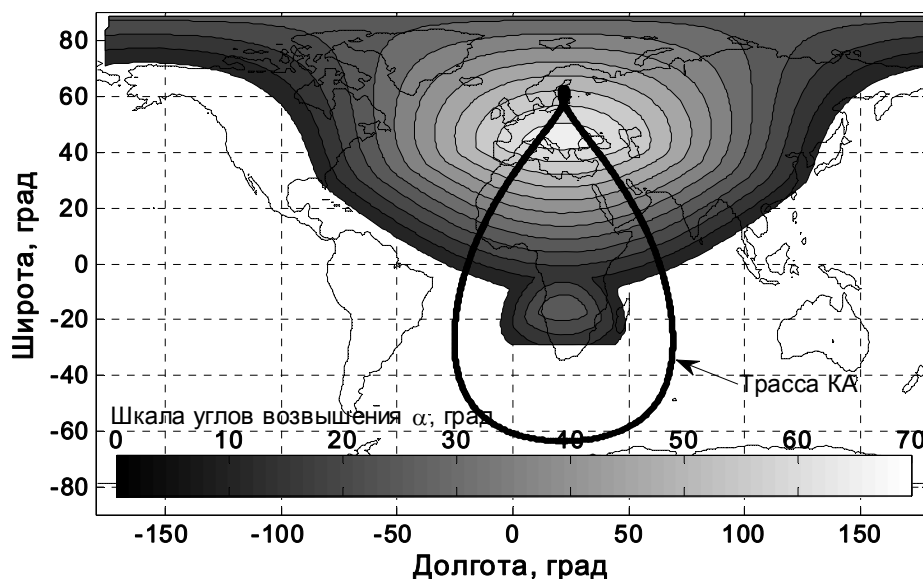


Рис. 19 Характеристики обзора односпутниковой СС на орбите периодом 24 часа

Заключение

Представлен краткий обзор развития методов проектирования спутниковых систем непрерывного обзора на круговых и эллиптических орбитах. Предпринята попытка классификации однородных систем на стыке понятий "тип системы" и "тип непрерывного обзора".

Описываются новые геометрические методы анализа и выбора спутниковых систем непрерывного обзора на круговых и эллиптических орбитах типа «Молнии», которые применимы для более сложного по сравнению с традиционным обзором точек на поверхности Земли - непрерывного обзора географической области одним спутником из системы. В основе этих методов лежит использование совместных двумерных отображений условий видимости (наблюдателя на поверхности Земли или произвольной географической области) и движения спутниковой системы в пространстве инерциальной долготы восходящего узла и времени. Приведены соответствующие примеры.

Библиографический список

1. Clark A. "Extra-terrestrial relays: can rocket stations give world-wide radio coverage", *Wireless World*, 1945, Oct., p. 465.
2. Vargo L.G. "Orbital patterns for satellite systems", *Journal of the Astronautical Sciences*, 1960, Vol. 7, № 4, 1960, p. 78.
3. Luders R.D., "Satellite networks for continuous zonal coverage", *ARS Journal*, 1961, Vol. 31, № 2, p. 179.
4. Gobetz F.W., "Satellite networks for global coverage", *Journal of the Astronautical Sciences*, 1961, Vol. 8, № 4, p. 114.
5. Ullock M.H., Shoen A.H., "Optimum Polar Satellite Networks for Continuous Earth Coverage", *AIAA Journal*, 1963, Vol. 1, pp. 69–72. (Русский перевод: Аллок М., Шоун А. Оптимальные сети полярных спутников для непрерывного обзора Земли // *Ракетная техника и космонавтика*. 1963. Т. 1. № 1. С. 85.)
6. Easton R.L., Brescia R., "Continuous visible satellite constellations", *National Research Laboratory. Reports 6896*. - Washington(Dc), 1969. - 45p.
7. Можяев Г.В., "К проблеме оптимизации орбит спутниковых систем, предназначенных для непрерывного обзора поверхности земли", *Третий Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике: Аннот. докладов*. - М., 1968. - С. 215.

8. Можаяев Г.В., "Задача о непрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы. 1, 2", Космич. исслед. 1972. Т. 10. № 6. С. 833–839. 1973. Т. 11. № 1. С. 59–69.
9. Walker J.G., "Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage", Royal Aircraft Establishment, Technical Report 70211. - Farnborough (England), 1970. - 45 p.
10. Walker J.G., "Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage", Journal of British Interplanetary Society, 1971, Vol. 24, №11, pp. 369–384.
11. Можаяев Г.В., Синтез орбитальных структур спутниковых систем: (Теоретико-групповой подход). М.: Машиностроение, 1989.
12. Каталог систем непрерывного обзора сферы. Части 1-4, Системы одно, двух, трех и четырехкратного обзора: Технический отчет/ Мин. обороны, Руководитель темы Бырков Б.П. -М., 1973. - Ч.1-248 с.; Ч.2.- 242 с.; Ч.3- 251 с.; Ч.4- 220 с.
13. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А., Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов, М.: Машиностроение, 1975.
14. Emara E.T., Leondes C.T., "Minimum number of satellites for three-dimensional continuous worldwide coverage", IEEE Transactions of Aerospace and Electronics Systems, 1977, Vol. 13, № 2, p. 108.
15. Beste D.C., "Design of satellite constellations for optimal continuous coverage", IEEE Transactions of Aerospace and Electronics Systems, 1978, Vol. 14, № 3, p. 466.
16. Ballard A.H., "Rosette Constellation of earth satellites", IEEE Transactions of Aerospace and Electronics Systems. - 1980. - Vol. 16, № 5. - P. 656.
17. Walker J.G. , "Satellite constellations", Journal of British Interplanetary Society, 1984, Vol. 37, № 12, p. 559.
18. Hanson J.M., Higgins W.B., "Designing good geosynchronous constellations", Journal of the Astronautical Sciences, 1990, Vol. 38, № 2, p. 143.
19. Галиев Ш.И., Заботин В.П., "Система из минимального числа спутников для многократного обзора земли", Исследование Земли из космоса, 1990, № 5, С. 102.
20. Лебедев А.А., Нестеренко О.П., Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование, -М. , Машиностроение, 1991, 223 стр.
21. Самусенко О.Е., "Спутниковые системы непрерывного глобального обслуживания космических областей", К.Э. Циолковский и проблемы ракетной и космической техники: Труды 26 чтений по разработке научн. наследия и разв. идей. - М., 1992. - С. 30.

22. Oli P.V.S. Nagarajan N., Rayan H.R., "Global communication using a constellation of low earth meridian orbits", IEEE Transactions of Aerospace and Electronics Systems, 1993, Vol. 29, № 3, p. 697.
23. Yuan B.F., Matsushima K., "Synthesis leo constellations for continuous global coverage", Transactions of Jap. Society on Aeronautical and Space Sciences, 1994, Vol. 37, №. 116, p. 96.
24. Lang T.J., Hanson J.M., "Orbital constellations which minimize revisit time", AIAA Paper 1983-402, 9p p.
25. Rider L. "Optimized polar orbit constellations for redundant earth coverage", Journal of the Astronautical Sciences, 1985, Vol. 33, №. 2, p. 147.
26. Rider L., "Analytic design of satellite constellations for zonal earth coverage using inclined circular orbits", Journal of the Astronautical Sciences, 1986, Vol. 34, №. 1, p. 31.
27. Lang T.J., "Symmetric circular orbit satellite constellations for continuous global coverage", Astrodynamics 1987: Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference. - Kalispell(MT), 1987. 12 p.
28. Adams W.S., Rider L., "Circular polar constellations providing continuous single or multiple coverage above a specified latitude", Journal of Astronautical Sciences, 1987, Vol. 35, №. 2, p. 155.
29. Lang T.J., "Optimal Low Earth Orbit Constellations for Continuous Global Coverage", AAS Paper. 1993-597, 17 p.
30. Lang T.J., Mayer J.L., "A new six satellite constellation for optimal continuous global coverage", AAS Paper 1995- 221, 8 pp.
31. Lang T.J. "Low Earth orbit satellite constellations for continuous coverage of the mid-latitudes", AIAA Paper 1996, No. 3638. 9 pp.
32. Lang T.J. and Adams W.S., "A Comparison of Satellite Constellations for Continuous Global Coverage", IAF Workshop on Mission Design and Implementation of Satellite Constellations. - Toulouse (France), 1997. Paper 97-D4, 9 pp.
33. Ulybyshev Y., "Near-Polar Satellite Constellations for Continuous Global Coverage", Journal of Spacecraft and Rockets, 1999, Vol. 36, №1, pp. 92-99.
34. Ely T. A., Crossley W. A. and Williams E. A., "Satellite Constellation Design for Zonal Coverage Using Genetic Algorithms", AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting.- Monterey(CA), 1998, 12 p. (AAS Paper 98-128).

35. Frayssinhes E., "Investigating new satellite constellation geometries with genetic algorithms", AIAA/AAS. Astrodynamics Conference. - San Diego (CA), 1996. 9 pp. (AIAA Paper 96-3636).
36. Mason Wi., Coverstone-Carroll V. Hartmann J.W., "Optimal Earth orbiting satellite constellations via a Pareto Genetic Algorithm", AIAA Paper, 1998. №. 4381. 11 pp.
37. Саульский В.К., "Метод расчета орбитальных группировок спутниковых систем для непрерывного обзора Земли", Космич. Исслед, 2003, Т. 41, № 4, С. 63-68.
38. Саульский В.К., "Многоспутниковые системы с линейной структурой и их применение для непрерывного обзора Земли", Космич. исслед., 2005, Т. 43, № 1, С. 36–53.
39. Можаяев Г.В. , "Возможности кинематически правильных спутниковых систем с группами симметрии первого типа в задаче непрерывного однократного обзора Земли", Космич. исслед., 2005. Т. 43. № 3. С. 215-223.
40. Winn B.C. and Mennemeyer P., "Coverage Obtained by Controlled Satellite Constellations for Regional Communications," Journal of Spacecraft and Rockets, 1972, Vol. 9, No. 2, pp. 92-95.
41. Gutenev A.A., "Optimization of low-altitude global communications constellations", Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1992, Vol. 15, № 4, p. 871.
42. Галиев Ш.И., Заботин В.И., "Модели спутниковых систем глобальной связи и методы анализа и синтеза их структур", Исследование Земли из космоса, 1993, № 5, С. 66.
43. Lansard E., Frayssinhes E., Palmade J.-L., "Global design of satellite constellations: a multi-criteria performance comparison of classical walker patterns and new design patterns", Acta Astronautica, 1998, Vol. 42, №9, pp. 555-564.
44. Ulybyshev Y., "Geometric Analysis of Low Earth Orbit Satellite Communication Systems: Covering Functions," Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, Vol. 37, No. 3, pp. 385-391.
45. Zhang J., He X.-S., et all, "Designing twin-station LEO constellation for Zonal Coverage", AIAA Paper 2004-325.
46. Suzuki R., "A study of leo constellation with figure-of-eight shape ring network", 58th International Astronautical Congress, Sep 24 - Sep 28 2007, Hyderabad, India, Paper IAC-06- B3.1.9, 15 pp.
47. Ulybyshev Y., "Satellite constellation design for complex coverage", Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, Vol. 45, pp. 843-849.

48. Hanson J.M., Linden A., "Improved low-altitude constellation design methods", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1989, Vol. 12, № 2, p. 229.
49. Ракетно-космическая корпорация "Энергия". 1946-1996, -М.: 1996.
50. Чернявский Г.М., Бартенев В.А., Орбиты спутников связи, -М.: Связь, 1978.
51. Бырков Б.П., Силов В.В., Никитин И.Н., "Использование временных диаграмм видимости для выбора одномаршрутных систем ИСЗ на эллиптических орбитах", Тр. 18 Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Механика космического полета». Калуга. 1983. С. 38-45.
52. Draim J.E., "Three - and four-satellite continuous-coverage constellations", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1985, Vol. 8, № 6, p. 725. (Русский перевод: Дрейм Дж. Е., " Непрерывный обзор земной поверхности с помощью трех и четырех спутников", *Аэрокосмическая техника*, 1986, № 8, С. 99.).
53. Draim J.E., "A common-period four-satellite continuous global coverage constellations", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1987, Vol. 10, № 5, p. 492.
54. Draim J.E., "Continuous global N-tuple coverage with $(2N+2)$ satellites", *Astrodynamics 1989:Proceedings AAS/AIAA Astrodynamics Conference*. - San Diego (CA), 1990. 6p.
55. Draim, J.E.; Castiel, D., "Elliptic constellations for optimal coverage of selected geographical areas", 16th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. -Washington (DC), 1996.- 9 p. (AIAA Paper 96-1075).
56. Draim J. The ellipso Satellite - Application of Small Satellite Principles To the Space Segment of a Global Mobile Personal Communications System, 12 th AIAA/USU Conference on Small Satellites. - Logan (Utah), 1998. - 8 p.
57. Draim, J.E., Cefola, P.J., Castiel, D, "Elliptical Orbit Constellations: A New Paradigm for Higher Efficiency in Space Systems?", Paper presented at the IEEE 2000 Conference, Big Sky Montana, March 18-25, 2000
58. Draim J.E., Cefola P.J., Ernandes K.J., "Seamless Handovers in Cobra Teardrop Satellite Arrays", 57th International Astronautical Congress 2006, Paper IAC-06-B3.2.02, 15 pp.
59. Draim J.E, Gefola P.J. and Lansard E., "Orbital constellations for multimedia satellite communications systems serving Europe", 58th International Astronautical Congress , Hyderabad, India, 24 - 28 September 2007 , Paper IAC-07-B2.6.02, 14 pp.
60. Palmerini G.B., "Design of global coverage constellations based on elliptical orbits", *AIAA Paper*. - 1996.- №. 3637.- 9 p.
61. Ulybyshev Y.P., Donianz V.N., "Elliptic Orbit Constellations for Regional Communication and Molniya-Zond Satellite Constellation", 53rd Int. Astronautical Congress, Houston (USA). Oct .10-19, 2002. paper IAC-02-M.4.05. P.8.

62. Dufour F., "Coverage optimization of elliptical satellite constellations with an extended satellite triplet method", 54th International Astronautical Congress, Bremen (Germany), 29 Sep. - 3 Oct. 2003. paper IAC-03-A.3.02. P.9.
63. Mortari, D., Wilkins, M.P., Bruccoleri C., "The Flower Constellations", Journal of the Astronautical Sciences, 2004. V. 52, № 1-2. P. 107-127.
64. Заботин В.И., "Модели спутниковых систем глобальной связи на эллиптических орбитах", Исследование Земли из космоса, 1994, № 5, С. 70.
65. Абушаев А.А., Заботин В.И., "К задаче анализа спутниковых систем глобальной связи", Изв. Вузов. Авиационная техника, 1996, № 2, С. 10-15.
66. Заботин В.И., "Задача кратного обзора земли спутниковыми системами глобальной связи на эллиптических орбитах", Космические исследования, 1997, Т. 35, № 4. С. 445-448.
67. Галиев Ш.И., Кузьмин А.В., "Применение областей Дирихле- Вороного к задаче минимизации энергетических затрат спутниковых систем обзора Земли", Космические исследования, 1999, Т. 37, № 3, С. 332-336.
68. Заботин В.И., "Достаточные условия существования спутниковых систем многоканальной глобальной связи", Космические исследования, 2000, Т. 38, № 1, С. 97-101.
69. Barker, L., Stoen, J., "Sirius Satellite Design: The Challenges of the Tundra Orbit in Commercial Spacecraft Design", Advances in Astronautical Sciences, Vol. 107. 2001, pp. 575–596 (AAS Paper 01-071).
70. Ulybyshev Y.P., Donianz V.N., "Dynamic Communication Networks Using Satellite Constellations and Ground Stations", 53rd Int. Astronautical Congress, Houston (USA), Oct .10-19, 2002, paper IAC-02-M.4.07.
71. Donianz V.N., Ulybyshev Y.P., Zemskov E.F., "Satellite Networks using Mid-Altitude Elliptical Orbit Constellation "MOLNIYA-ZOND" 55th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, Vancouver (Canada), 4-8 Oct. 2004 , paper IAC-04-IAF-M.5.08
72. Turner A., "Non_GEO-Constellations for commercial telecommunications applications", AIAA Paper 2004-3164.
73. Разумный Ю.Н., "Локально стационарные орбиты искусственных спутников Земли", Тр. 25 Чтений К.Э. Циолковского. Секция "Проблемы ракетной и космической техники". М.: ИИЕТ АН СССР. 1991. С. 56-61.
74. Кантор Л.Я., Хейфец В.Н., "Оптимальный выбор системы спутникового вещания на базе высокоэллиптических орбит", Космич. Исслед, 2005. Т. 43, № 1. С. 36–53.

75. Улыбышев Ю.П., “Проектирование спутниковых систем непрерывного обзора на эллиптических орбитах типа «МОЛНИИ»”, *Космические исследования*, 2009 Т. 47, № 3.
76. Малышев В.В., Красильщиков М.Н., Бобронников и др, *Спутниковые системы мониторинга*, Под. Ред. Малышева В.В. - М.: Изд-во МАИ, 2000. 568 с.
77. *Orbital mechanics*, Ed. Chobotov V., 2002, AIAA Educational Series.
78. *Mission geometry; orbit and constellation design and management*, Wertz, et al, 2001, Microcosm Press & Kluwer Academic Publishers
79. Lo M.W., “Satellite-Constellation Design”, *Computing in Science & Engineering*, 1999, Vol. 1, №. 1, pp. 58-67.
80. Draim J., “Satellite constellations”, 55 Int. Astronautical Congress, Vancouver (Canada). Oct. 10-19, 2004. paper IAC-04-A.5.01.
81. Asvial, M.; Tafazolli R. and Evans B., “Genetic Hybrid Satellite Constellation Design”, 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit, Yokohama, Japan, Apr. 15-19, 2003 AIAA Paper 2003-2283
82. Chan S., Samuels A., Shah N., Underwood J. and de Weck O., “Optimization of Hybrid Satellite Constellations Using Multiple Layers and Mixed Circular-Elliptical Orbits”, 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit 2004 (ICSSC), Monterey, California, May 9-12, 2004, AIAA Paper 2004-3205.
83. Berg, M., Kreveld, M., Overmars M., and Schwarzkopf O., *Computational Geometry: Algorithms and Applications (Second Edition)*, Springer-Verlag, New York. 2000, 367 pp. (Chaps. 1-3).

Сведения об авторе

Улыбышев Юрий Петрович, доктор технических наук, зам. руководителя НТЦ-начальник отдела космической баллистики, Ракетно-космическая корпорация “Энергия”

141070, г. Королев, Моск. Обл., ул. Ленина, д. 4А

Тел. 513-64-06, моб. 8-903-595-3585

Факс 513-61-38

Email: yuri.ulybyshev@rsce.ru.