

ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Новая постановка старой задачи о расчёте зон обслуживания систем спутниковой связи



А.А. Акимов

Первые публикации, связанные с задачей расчёта зон обслуживания для систем спутниковой связи, появились в 1977 г. [1]. В 1982 г. в свет вышла книга Л.М.Машбица «Зоны обслуживания систем спутниковой связи». В этой работе впервые на систематической основе рассматривались методы расчёта и отображения зон обслуживания космических аппаратов (КА) связи, находящихся на геостационарной орбите. Нужно отметить, что выход книги в свет по времени совпал с появлением в СССР персональных ЭВМ. Поскольку в книге давались конкретные методики и алгоритмы расчёта, она сразу стала исключительно востребованной. Однако методы расчёта, изложенные в [1 и 2], предназначались для расчёта и анализа зон обслуживания КА, находящихся на геостационарной орбите. Дальнейшее развитие работ в данной области было связано с тем, что интенсивно стали исследоваться системы связи, использующие негеостационарные КА. К этому времени были развернуты спутниковые системы связи, построенные с использованием высокоэллиптической орбиты типа «Молния». Поэтому достаточно быстро появились публикации, в которых показывалось, что задача расчёта зон была перенесена на случай негеостационарных КА [3,4]. Однако вскоре стало ясно, что методы, связанные с построением мгновенных зон обслуживания, могут применяться достаточно ограниченно, поскольку исследования, проводимые на их основе, в основном давали представление о динамике и эволюциях их движения, не давая каких либо количественных характеристик. Поскольку в конце 90-х годов интенсивно стали развиваться низкоорбитальные многоспутниковые системы связи, то появилась объективная необходимость в создании нового подхода к анализу зон обслуживания именно для таких систем. Попытки просто отобразить одновременно большое количество зон приводили к совершенно неинтерпретируемым картинкам, с помощью которых нельзя было сделать определённых выводов.

В 1996 г. практически одновременно вышли в свет две статьи [5,7]. В них предлагался новый подход к определению, построению и анализу зон обслуживания многоспутниковых систем, использующих КА на негеостационарной орбите. В работе [5] описывалась методика построения обобщённых зон путём накопления результатов расчёта видимости созвездий КА в узлах мерной географической сетки, образующей матрицу для накопления и усреднения. Элементы матрицы путём линейного преобразования сопоставлялись с экранными координатами и давали возможность визуализировать

получаемые результаты. В статье [7] расчётная методика не обсуждалась, однако приводимые в ней картины распределений доступности КА для базовых станций низкоорбитальной системы связи «Глобалстар» позволяют заключить, что авторы использовали аналогичную методику расчёта.

Стало понятно, что метод имитационного моделирования позволяет получать интегральные характеристики распределений доступности космических аппаратов для многоспутниковых систем связи, использующих негеостационарные орбиты. Кроме этого, в расчётах можно было учитывать алгоритм управления системой связи на уровне включения и выключения бортовых ретрансляторов космических аппаратов, что позволяет, в частности, решать задачи обеспечения территориальной электромагнитной совместимости [6]. Кроме этого, кривые зависимости наблюдаемости созвездий космических аппаратов, состоящих из не менее чем 1,2,3 и т.д. КА, в зависимости от широты места расположения абонентов стали практически одной из важнейших характеристик для систем связи, использующих негеостационарные КА [8].

Такой подход позволяет проводить исследования устойчивости покрытия, формируемого системами спутниковой связи с многоспутниковыми орбитальными группировками негеостационарных КА, как с точки зрения стабильности орбитальных группировок [10], так и с точки зрения отказов КА [11,13], а также анализировать особенности, связанные с размещением земных станций сопряжения [9].

По существу, критерий для построения зон, гарантирующих доступность для абонентов космических аппаратов по заданному уровню вероятности, является универсальным инструментом для проектирования и анализа космических систем связи, использующих негеостационарные КА [12,14,15].

К сожалению, в настоящее время нет программных средств, позволяющих проводить подобные расчёты. Правда существует программный комплекс STK, позволяющий, в том числе, исследовать распределения доступности КА многоспутниковых систем. Однако этот программный комплекс не продаётся для российских потребителей, поскольку существуют ограничения правительства США на распространение ключевых научно-технических технологий. Поэтому попытки официального приобретения и использования на территории России данного программного обеспечения и связанные с этим переговоры заканчиваются ничем. Кроме того, официальный сайт разработчика компании www.agi.com закрыт (на момент опубликования статьи) для доступа с территории Российской Федерации. В то же время анонимный доступ от лица серверов в США обеспечивается. Таким образом, особенно важно, что разработанное

в ЗАО «Информационный Космический Центр «Северная Корона» [16] программное обеспечение доступно для российского потребителя, может быть приобретено, развивается и решает описанный круг задач.

Список литературы

1. Л.М. Машбиц Зоны гарантированного и регламентированного уровней сигнала системы спутниковой связи», М. Радиотехника, N12 1977 г.
2. Л.М. Машбиц «Зоны обслуживания систем спутниковой связи». Москва, изд. «Радио и связь», 1982 г.
3. А.А.Акимов, А.М.Аносов, Г.С.Гусаков, и др. «Анализ зон радиовидимости систем спутниковой связи на ИСЗ, размещаемых на орбитах различных типов», ISSN 0013-5771, Электросвязь, N1, 1992г.
4. А.А.Акимов, И.А.Палкин, «Исследование распределения энергии излучения спутникового ретранслятора по зоне радиовидимости с учётом особенностей бортовых антенн со сложной диаграммой направленности» . ISSN 0013-5771, Электросвязь, N8, 1994г.
5. А.А. Акимов, М.Я. Талмуд, И.А. Палкин, «Применение метода обобщенных зон для анализа и проектирования систем спутниковой связи». Материалы 2 международной конференции «Спутниковая связь» Т.1 с.141-151. Москва 1996.
6. А.А. Акимов, И.Б. Дунаев, Г.В. Кузьмин «Использование алгоритмов управления в низкоорбитальных системах связи для обеспечения ЭМС» Радиотехника N7 1996. Радиосистемы Вып. 19 Конфликтно устойчивые радиоэлектронные системы N1.
7. Amre El-Hoiydi, CSEM, Jaquet-Droz 1, 2007 Neuchatel, Switzerland, Robert J. Finean, BT Laboratories, MLB4-67 Marlesham Heath, Ipswich IP5 7RE, UK, «Location Management for the Satellite - Universal Mobile Telecommunication System», IEEE 5 th International Conference on Universal Personal Communications ICUPC, 1996.
8. Harald Keller, Horst Salzwedel, Gunar Schorcht, Volker Zerbe. «Comparison of the Probability of Visibility of the Most Important Currently Projected Mobile Satellite Systems.» Faculty of Computer Science and Automation, Technical University of Ilmenau, Ilmenau. P.O.Box 0565,98684 Ilmenau / Germany. 4-7 May 1997.
9. Акимов А.А. «Особенности размещения наземных станций в системах связи через негеостационарные ИСЗ», Электросвязь 1998, N2.
10. Акимов А.А. Дунаев И.Б. «Влияние устойчивости группировки низкоорбитальных ИСЗ на характеристики их наблюдаемости», Электросвязь 1998, N2.
11. Park Chan-Wang, «Coverage Analysis in Case of Faults of Some Satellites in Low Earth Orbit Satellite Constellations». University of Science and Technology in Lille1 Cite Scientifique, Avenue Poincare B.P.69, 59652, Villeneuve d'Ascq, FRANCE. 12th AIAA/USU Conference on Small Satellites, 09/1998.
12. Lloyd Wood, «Internetworking with satellite constellations», Thesis submitted to the University of Surrey for the degree of Doctor of Philosophy. University of Surrey, Centre for communication systems research, annual report 1998.
13. Акимов А.А., МТУСИ, «Методика исследования устойчивости систем спутниковой связи к отказу космических аппаратов. Система связи «Иридиум» . доклады т.2, 4-я международная Конференция «Спутниковая связь 2000», Москва, 26-09-2000 г.
14. Акимов А.А., Буравин А.Е. «Спутниковая связь и навигация. Интеграция услуг». Изд. ГРОТЭК. Техника и средства связи. N4 2000 г.
15. Paul Massatt and Wayne Brady, «Optimizing performance trough Constellation Management», Crosslink, Summer 2002.
16. Гриценко А.А. «Программный комплекс поддержки принятия решений на этапах разработки, развертывания и эксплуатации спутниковых средств» //Новый оборонный заказ. Стратегии, 2013, N3 (25), С. 64-66.

*Акимов А.А.
Независимый эксперт*

Особенности расчета зон обслуживания низкоорбитальных спутниковых систем



А.А. Акимов

А.А. Гриценко

Р.Н. Юрьев

1. Актуальность

Пик интереса к низкоорбитальным системам спутниковой связи состоялся в конце XX-го столетия. Именно тогда были разработаны большинство из известных сейчас низкоорбитальных спутниковых систем. Но только малая часть из них была реализована. Прежде всего, это Iridium,

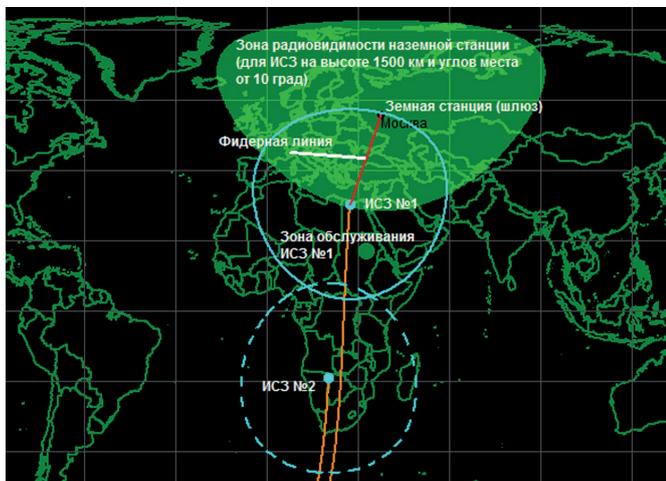
Globalstar, Orbcomm, частично «Гонец». В последнее время интерес к этим системам снова возрос. Услуги систем Iridium и Globalstar стали доступны на территории России. Начался более активный этап развития российской системы «Гонец». Однако объективная информация о реальных зонах обслуживания этих систем отсутствует. Поэтому, в данном материале представлены результаты расчета зон обслуживания некоторых систем.

2. Особенности расчета зон обслуживания низкоорбитальных спутниковых систем

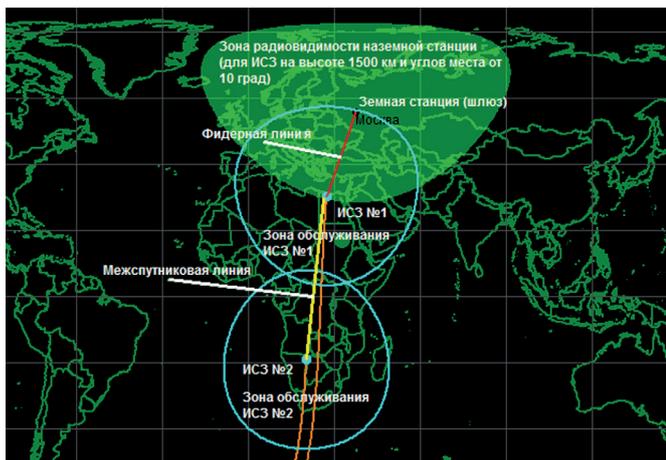
К низким или LEO (Low Earth Orbit) орбитам, как правило, относятся круговые орбиты высотой менее 2000 км. Зона радиовидимости спутника на такой орбите может покрывать достаточно большую, но все-таки ограниченную территорию. В пределах этой территории для абонентских станций (АС) могут быть организованы сервисные услуги реального времени (телефонная связь, передача данных и т.д.), но только в том случае, если спутник имеет доступ к земной станции сопряжения (шлюзу). Если такого доступа нет, то, как пра-

вило, реализуют сервисные услуги с задержкой исполнения, например, передача сообщений. Организация связи между АС, расположенными в зоне радиовидимости одного космического аппарата (КА), также возможна. Однако, вследствие движения КА и смещения его зоны радиовидимости, такие каналы достаточно кратковременны и плохо прогнозируемы.

Непосредственный доступ КА к наземной станции сопряжения (ЗС) возможен, если угол места из точки положения ЗС в направлении на КА выше требуемого (обычно 10 град). Для более наглядного представления часто на картах отображают зону радиовидимости станции – зону, в пределах которой для заданной высоты положения КА выполняются указанные требования по углу места. Пересекая границу такой зоны, спутник попадает в зону доступности станции сопряжения. Нужно отметить, что зоны радиовидимости имеют смысл только для систем на LEO-орбитах, все КА которых размещены на орбитах с примерно одинаковой высотой, так как размер зоны зависит как от угла места, так и от высоты положения орбиты КА.



а) Зона обслуживания без МЛС



б) Зона обслуживания при МЛС

Рис.1 Принцип формирования зоны обслуживания

Рассмотрим конкретный пример. На рис.1.а отображены зона радиовидимости станции сопряжения, а также часть траассы, текущее положение и зоны радиовидимости двух КА (№1 и №2). Высота орбиты соответствует 1500 км.

Первый КА пересек границу и вошел в зону радиовидимости станции сопряжения. Следовательно, в пределах зоны радиовидимости КА система может предоставлять сервисные услуги реального времени – образована зона обслуживания КА №1. Второй КА находится за пределами

зоны радиовидимости станции сопряжения, сервисные услуги реального времени не доступны, следовательно, зона обслуживания КА №2 не образована.

Результирующей зоной обслуживания является объединение всех зон обслуживания КА системы. В нашем примере, она будет соответствовать зоне обслуживания первого КА. Очевидно, что в следующий момент времени результирующая зона изменится, и будет определяться как новым положением спутников, так и доступностью станции сопряжения. Поэтому, зону обслуживания низкоорбитальной системы, соответствующей некоторому конкретному моменту времени, часто называют мгновенной зоной обслуживания.

Рассмотрим второй пример. На рис.1.б представлена аналогичная ситуация, но между КА организована межспутниковая линия связи (МЛС). В этом случае доступ к станции сопряжения второй КА может получить через первый. Мгновенной зоной обслуживания теперь уже будет суммарная зона обслуживания двух КА.

Однако мгновенная зона обслуживания не представляет практического интереса, так как отражает параметры системы по обслуживанию только на один момент времени. В другой момент – все может измениться. Гораздо больший интерес представляет интегрированная зона обслуживания, отражающая распределение надежности предоставления сервисов с привязкой к географическим координатам.

Для построения таких зон необходимо смоделировать работу системы на достаточном временном интервале наблюдения, фиксируя все события предоставления/отказа в обслуживании в каждой точке поверхности Земли. Совокупность точек, где вероятность обслуживания больше или равна требуемой, и представляет собой зону обслуживания системы с заданной надежностью.

Наиболее сложным является расчет зон обслуживания систем без МЛС, так как в этом случае зона определяется не только космическим, но и во многом земным сегментом. Для выполнения такого расчета необходимо наличие специальных программных комплексов. Поэтому, даже в официальных материалах операторов спутниковых сетей зоны обслуживания зачастую приводятся либо без указания соответствующей надежности, либо представляются суммарной зоной радиовидимости станций сопряжения, что, как будет показано ниже, мало соответствует действительности.

Проведем расчет зон обслуживания наиболее известных низкоорбитальных спутниковых систем Iridium, Globalstar, Orbcomm, а также российской системы «Гонец». Для решения этой задачи будем использовать специализированный программный комплекс «Спутниковые технологии», предназначенный для поддержки принятия решений на этапах создания, развертывания и эксплуатации спутниковых средств [1]. Оценку состояния систем на момент выполнения расчетов зон обслуживания будем проводить с использованием [1, 2].

3. Система Iridium

В орбитальной группировке (ОГ) системы Iridium используются МЛС, поэтому зона обслуживания системы определяется только космическим сегментом.

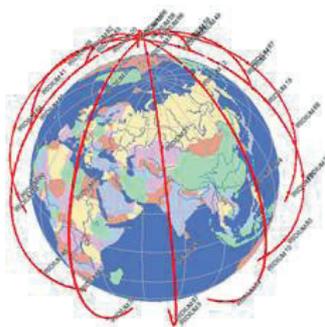
По данным Международного справочного регистра частот (МСРЧ) Бюро радиосвязи (БР) Международного союза электросвязи (МСЭ), система Iridium (сеть «НIBLEO-2») должна иметь следующие параметры космического сегмента: структура ОГ: 6x11 (6-ть плоскостей по 11 КА в каждой); мощность (число КА) ОГ: 66 КА; высота орбиты 780 км; наклонение орбиты 86.4 град. Расстановка плоскостей: на дуге 180 град. Фазовый угол между КА смежных плоскостей: 16.364 град. Спутники имеют систему коррекции орбиты.

Анализ текущего состояния орбитальной группировки системы показал, что по состоянию на ноябрь 2013 г ОГ



а) мгновенная зона обслуживания

функционирует в полном объеме. Как видно из рис. 2.б, 66 рабочих КА с достаточно высокой точностью удерживаются в своих номинальных позициях. Мгновенная зона обслуживания при ограничении на минимальный угол места в 10 град представлена на рис. 2а. Максимальное время наблюдения абонентом одного КА, при угле места 10 град., составляет 11 мин.



б) орбитальное построение

Рис.2 Система Iridium (ноябрь 2013 г)

Проведенные расчеты показали, что система обеспечивает глобальную зону обслуживания. И только в очень малом проценте времени в приэкваториальной полосе Земли могут быть отказы в обслуживании (эти участки видны на рис.2.а). Однако, вероятность таких отказов крайне мала.

4. Система Globalstar

В системе Globalstar не используются МЛС, поэтому зона обслуживания системы определяется как космическим, так и земным сегментами.

По данным МСРЧ БР МСЭ, заявлены следующие параметры космического сегмента (сеть «НВЛЕО-4»): структура ОГ: 8x6; мощность ОГ 48 КА; высота орбиты 1414 км; наклонение 52 град. Расстановка плоскостей: на дуге 360 град. Фазовый угол между КА смежных плоскостей: 34 град. Спутники имеют систему коррекции орбиты.



а) зоны радиовидимости наземного комплекса и мгновенная зона обслуживания системы
б) Орбитальное построение
Рис.3 Система Globalstar (ноябрь 2013 г)

Анализ текущего состояния ОГ системы показал, что по состоянию на ноябрь 2013 г ОГ системы функционирует в сокращенном варианте: структура ОГ: 8x4, мощность ОГ: 32 рабочих КА. Причем, как видно из рис. 3.б, оператором допускаются существенные отклонения положения КА от номинальных позиций в группировке.

Земной сегмент включает 26 станций сопряжения [3], расположенных в США (3 шт.), Никарагуа, Венесуэле, Порто-Рико, Канаде (2 шт.), Аргентине, Австралии (3 шт.), Южной Корее, Мексике, Нигерии, Перу, России (3 шт.), Турции, Франции, Бразилии (3 шт.), Китае и Италии.

На рис.3.а представлены суммарная зона радиовидимости наземного комплекса (зеленый цвет) и мгновенная зона обслуживания системы (ограничение по углу места 10 град). Фидерные линии между КА и станциями сопряжения обозначены красным цветом. Если станция сопряжения не доступна, то зона радиовидимости КА не отображается. На рис.3.б представлено текущее пространственное положение орбит системы. Максимальное время наблюдения абонентом одного КА, при угле места 10 град., составляет 18 мин.

Результат расчета зон обслуживания системы Globalstar по состоянию на ноябрь 2013 г представлен на рис. 4, где цветом обозначены зоны с надежностью 95, 99 и 99.999%.

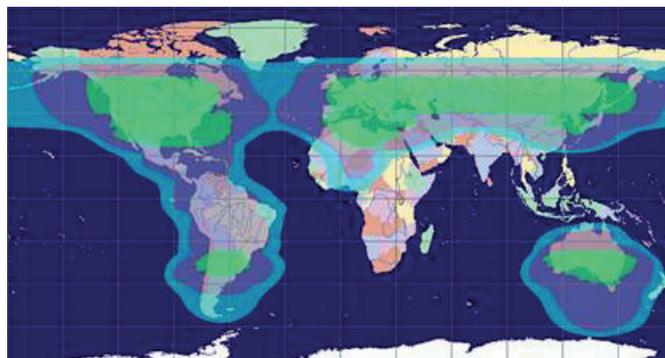


Рис. 4. Зоны обслуживания системы Globalstar (ноябрь 2013 г, 32 КА, надежность 95, 99 и 99.999%)

Интерес представляет также текущая зона обслуживания, формируемая только российскими станциями сопряжения. Результат расчета представлен на рис. 5. Цветом обозначены зоны с надежностью 95, 99 и 99.999%.

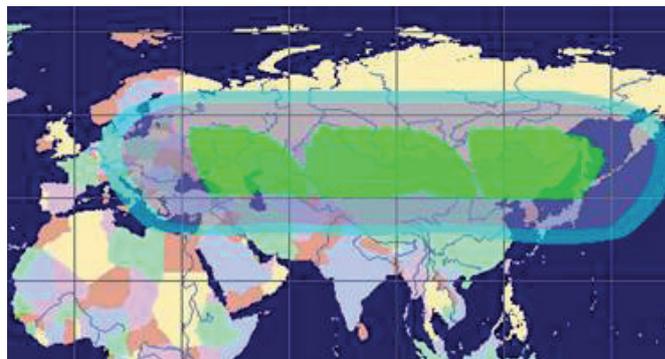


Рис. 5. Зоны обслуживания системы Globalstar, российский сегмент (ноябрь 2013 г, 32 КА, надежность 95, 99 и 99.999%)

Учитывая, что в ближайшей перспективе планируется обеспечить функционирование ОГ в полном объеме (заявленная структура ОГ: 8x6), выполним расчет зон обслуживания для этих условий. Результат расчета зон обслуживания системы Globalstar при полном развертывании ОГ представлен на рис. 6, где цветом обозначены зоны с надежностью 95, 99 и 99.999%.

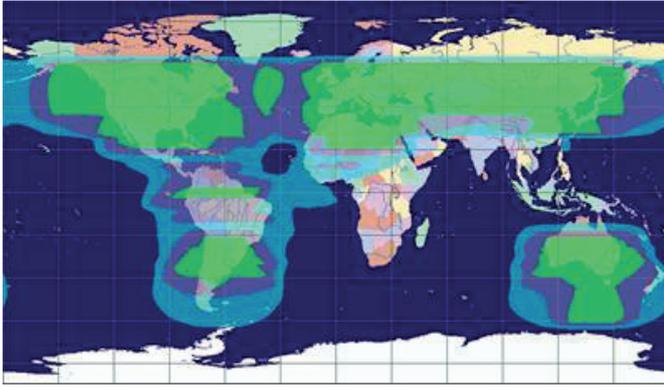


Рис. 6. Зоны обслуживания системы Globalstar (полная ОГ, 48 КА, надежность 95, 99 и 99.999%)

5. Система Orbcomm

В системе Orbcomm не используются МЛС, поэтому зона обслуживания системы определяется как космическим, так и земным сегментами.

Заявленная (сеть «LEOTELCOM-1») орбитальная группировка системы должна включать:

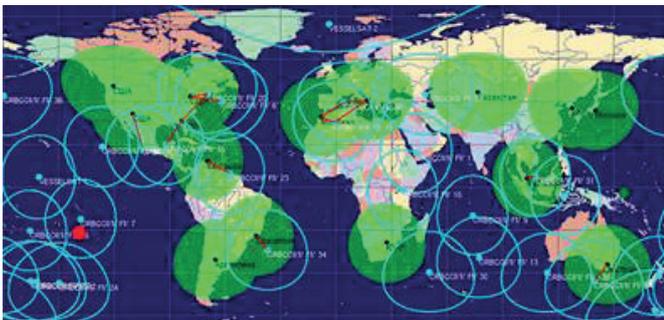
- базовую группировку из 36 КА (4x9) на орбитах наклонением 45 град и высотой 825 км;
- полярное дополнение в составе одиночных КА на орбитах с наклонением 70 град и высотой 740 км, и с наклонением 108 град и высотой 830 км.

Максимальное время наблюдения абонентом одного КА, при угле места 10 град., составляет 12 мин. Спутники не имеют системы коррекции орбиты.

Проведенный анализ текущего состояния ОГ системы показал, что по состоянию на ноябрь 2013 г орбитальная группировка, вероятно, включает 29 рабочих КА, включая два новых спутника Vesselsat (1 и 2). При этом структура космического сегмента следующая:

- базовую группировку составляют 26 КА, развернутые в 4-х плоскостях, где размещены 5, 7, 8 и 6 КА соответственно, с наклонением орбиты 45 град и средней высотой 790 км;
- дополнительные КА на орбитах с наклонением 20, 97,5 и 108 град и высотой соответственно 860, 475 и 807 км.

По разным оценкам, земной сегмент включает 15 станций сопряжения [4], расположенных в США (5 шт.), Аргентине, Австралии, Бразилии, Кюрасао, Италии, Японии, Казахстане, Малайзии, Южной Кореи, Марокко и Южной Африке.



а) зоны радиовидимости наземного комплекса и мгновенная зона обслуживания системы
б) Орбитальное построение
Рис.7 Система Orbcomm (ноябрь 2013 г)

На рис.7.а представлены суммарная зона радиовидимости наземного комплекса (зеленый цвет), а также мгновенная зона обслуживания

системы (ограничение на угол места в 10 град). Фидерные линии, образованные между КА и станциями сопряжения, обозначены красным цветом. На рис.7.б представлено текущее пространственное положение орбит системы.

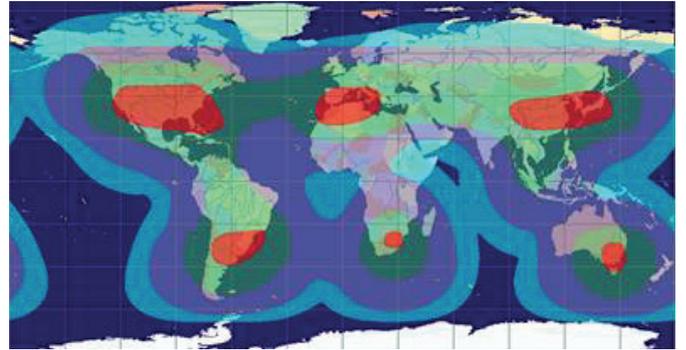


Рис. 8 Зоны обслуживания системы Orbcomm (ноябрь 2013, 29 КА, надежность 1, 20, 50 и 70%)

Результат расчета зон обслуживания представлен на рис. 8, где цветом обозначены зоны с надежностью 1, 20, 50 и 70%.

6. Система Гонец

В системе Гонец не используются МЛС, поэтому зона обслуживания системы определяется как космическим, так и земным сегментами.

Заявленная (сеть «GONETS-M») орбитальная группировка системы должна включать 48 КА (6x8) на орбитах наклонением 82,5 град и высотой 1500 км. Расстановка плоскостей: на дуге 180 град. Спутники не имеют системы коррекции орбиты. Максимальное время наблюдения абонентом одного КА (мин. угол места 10 град) составляет 18 мин.

Анализ текущего состояния ОГ показал, что по состоянию на ноябрь 2013 г орбитальная группировка системы функционирует в сокращенном объеме: на рабочих орбитах находятся 5 КА «Гонец-М», размещенных в двух плоскостях, разнесенных по долготе восходящего узла на 90 град.

Земной сегмент (по данным [5]) включает 4-е станции сопряжения, размещенных на территории России в городах Москва, Железногорск (Красноярский край), Южно-Сахалинск и на полуострове Тикси.



а) зоны радиовидимости наземного комплекса и мгновенная зона обслуживания

На рис.9.а представлены суммарная зона радиовидимости наземного комплекса (зеленый цвет), а также мгновенная зона обслуживания системы (ограничение на угол места в 10 град). Фидерные линии, образованные между КА и станциями сопряжения, обозначены красным цветом.



б) Орбитальное построение
Рис.9 Система Гонец (ноябрь 2013)

На рис.9.б представлено текущее пространственное положение орбит системы.

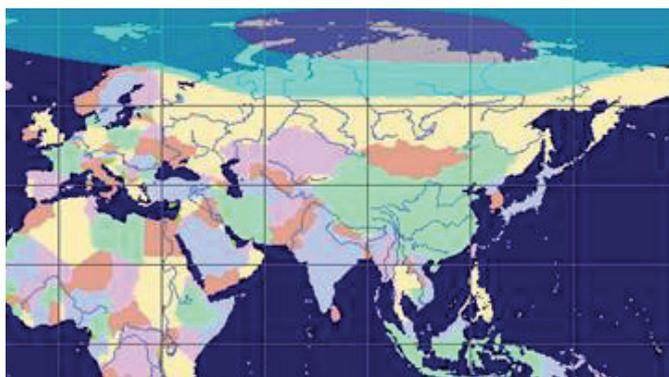


Рис.10 Зоны обслуживания системы Гонец на ноябрь 2013 г (ноябрь 2013; 5-ть КА; надежность 40 и 50%)

Результат расчета зон обслуживания системы по состоянию на ноябрь 2013 г представлен на рис. 10, где цветом обозначены зоны с надежностью 40 и 50%.

По данным [5] в перспективе планируется довести мощность ОГ до 12 КА (4x3), а затем и до 24 (4x6) КА. В связи с этим был проведен расчет зон обслуживания системы для этих вариантов.

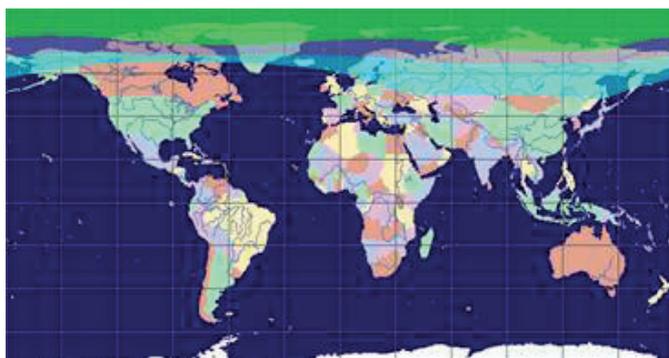


Рис.11. Зоны обслуживания с надежностью 60, 80, 95% (ОГ 4x3=12 КА, угол места от 7 град, ЗС 5 шт с Мурманском)



Рис.12. Зоны обслуживания с надежностью 80, 95, 99% (ОГ 4x6=24 КА, угол места от 7 град, ЗС 5 шт с Мурманском)

Результат расчета зон обслуживания для мощности ОГ 12 КА представлен на рис. 11, где цветом обозначены зоны с надежностью 60, 80 и 95%. Результат расчета зон обслуживания для мощности ОГ 24 КА представлен на рис. 12, где цветом обозначены зоны с надежностью 80, 95 и 99%.

Выводы.

Таким образом, зоны обслуживания низкоорбитальных спутниковых систем носят вероятностный характер и определяются целым рядом факторов: структурой орбитальной группировки, территориальным размещением элементов наземного комплекса, требованиями пользователей. Информация о зоне обслуживания актуальна только тогда, когда указана соответствующая ей надежность. Расчет зон обслуживания возможен только при использовании специализированного программного обеспечения, к которому относится программный комплекс «Спутниковые технологии». С использованием данного программного комплекса выполнен расчет зон обслуживания наиболее известных низкоорбитальных спутниковых систем. Полученные результаты могут быть полезны при планировании организации связи между подразделениями отдельных министерств и ведомств Российской Федерации.

Литература

1. Гриценко А.А. «Программный комплекс поддержки принятия решений на этапах разработки, развертывания и эксплуатации спутниковых средств»//Новый оборонный заказ. Стратегии, 2013, N3 (25), С. 64-66.
2. www.space-track.org
3. www.globalstar.com
4. www.orbcomm.com
5. www.gonets.ru

*А.А. Акимов,
независимый эксперт;
А.А. Гриценко,
Генеральный директор
ЗАО «Информационный Космический Центр
«Северная Корона»
Р.Н. Юрьев,
Заместитель начальника отдела
ЗАО «Информационный Космический Центр
«Северная Корона»*