

УДК 621.396

Оценка зоны обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ

Д. В. Антонов

АО «Российские космические системы»

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Аннотация. В данной работе впервые предложен алгоритм выбора спутников-ретрансляторов, который итерационным способом оптимизирует зону обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального (СПОИ-СО) сегмента КОСПАС–САРСАТ.

Проанализирована эффективность имеющихся на данный момент 4- и 6-антенных СПОИ-СО при работе с неподвижными и медленно подвижными АРБ. Показана невозможность 4-антенных СПОИ-СО определять координаты медленно подвижных аварийных буев (АРБ) с заданным качеством, в то время как 6-антенный СПОИ-СО способен удовлетворять требованиям по точности среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС) как для неподвижных, так и для медленно подвижных АРБ.

Представлены результаты математического моделирования величины зоны обслуживания в зависимости от алгоритма планирования и количества антенн, установленных на СПОИ-СО с учетом медленно подвижных АРБ. Полученные результаты призваны определить минимальное количество антенн, требуемое для покрытия желаемой площади обслуживания. Отмечено, что нужное количество антенн можно получить либо установкой их на СПОИ-СО, либо с помощью обмена измерениями с соседними СПОИ-СО при условии их скоординированной работы.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, СССПС, СПОИ-СО, зона обслуживания, алгоритм выбора спутников-ретрансляторов

Estimation of the Middle Earth Orbit Location User Terminal Coverage Area

D. V. Antonov

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: antonov_dv@spacecorp.ru

Abstract. This article for the first time presents an algorithm for satellite picking that iteratively optimizes the coverage area of the Middle Earth Orbit Location User Terminal (MEOLUT).

The mathematical simulation performance results of the existing MEOLUTs with four and six antennas when they detect a fixed and slow moving beacon are presented. It is shown that the MEOLUT with four antennas cannot locate slow moving beacons with the required accuracy while the MEOLUT with six antennas is capable of meeting requirements working with fixed and slow moving beacons.

A mathematical simulation of the MEOLUT coverage area depending on the number of antennas at the MEOLUT and an algorithm for satellite picking are presented. These results are to determine the minimum number of antennas that allow one to reach the desirable coverage area. It is noticed that this number of antennas can be obtained either by installing antennas or by the process of the measurements exchange with the nearest MEOLUTs.

Keywords: COSPAS–SARSAT, MEOSAR, MEOLUT, coverage area, algorithm for satellite picking

Введение

Важнейшей характеристикой станции приема и обработки информации среднеорбитального (СПОИ-СО) сегмента КОСПАС–САРСАТ является зона обслуживания — область поверхности Земли, в которой СПОИ-СО способна удовлетворять требованиям, описанным в [1].

При фиксированных точностях измерений времен прихода сигнала аварийного радиобуя (АРБ) на спутники-ретрансляторы (ТОА — Time Of Arrival) и его частот (ФОА — Frequency Of Arrival) размер зоны обслуживания зависит от алгоритма выбора спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн СПОИ-СО, количества антенн на СПОИ-СО и алгоритма определения координат АРБ.

В предположении нормального распределения ошибок измерений ТОА и ФОА алгоритм определения координат, описанный в [5], является оптимальным. Таким образом, размер зоны обслуживания можно увеличить за счет увеличения количества информационно-измерительных комплексов и оптимизацией алгоритма планирования выбора спутников-ретрансляторов.

Так как значительную часть стоимости СПОИ-СО составляет стоимость информационно-измерительных комплексов, входящих в нее, то одним из приоритетных является вопрос о минимальном количестве антенн, необходимом для достижения желаемой зоны покрытия СПОИ-СО. На данный момент в литературе не встречается исследований, направленных на решение указанной задачи. Также не представлены исследования оценки зоны обслуживания для уже существующих 4- и 6-антенных СПОИ-СО с учетом наличия медленно подвижных радиобуев.

Таким образом, в рамках настоящей работы будет проведен анализ размера зоны обслуживания уже существующих СПОИ-СО, а также будет исследован размер зоны обслуживания СПОИ-СО в зависимости от количества антенн и алгоритма планирования наведения антенн СПОИ-СО на спутники-ретрансляторы.

Обзор алгоритмов планирования

В [2] приводится ссылка на два алгоритма выбора спутников для наведения на них антенн СПОИ-СО.

Первый из этих алгоритмов является эвристическим и предлагает выбирать спутники-ретрансляторы с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО. Достоинством этого метода являются его простота и быстрота расчета. К недостаткам стоит отнести отсутствие оптимизации при выборе спутников-ретрансляторов.

Второй алгоритм предлагает полный перебор всех возможных наборов спутников-ретрансляторов. Для каждого набора в круге с центром в месте расположения СПОИ-СО и радиусом 2000 км вычисляется средний геометрический фактор в предположении о неподвижности АРБ (расчет геометрического фактора приведен в [1]). Для наведения антенн СПОИ-СО выбирается тот набор спутников-ретрансляторов, который имеет наилучший средний геометрический фактор. К достоинствам алгоритма следует отнести наличие оптимизации при выборе набора спутников-ретрансляторов. Недостатки — потенциально большая трудоемкость полного перебора, отсутствие учета медленно подвижных АРБ, а также то, что в процессе выбора комбинации спутников не проверяется, в какой части зоны ответственности СПОИ-СО выполняются заданные требования. На рис. 1 приведен пример, когда наилучшая средняя точность не является правильным критерием выбора спутников-ретрансляторов. В этом примере средняя точность в зоне обслуживания в первом случае — 2,1 км, однако не во всей зоне ответственности выполняется требование по точности независимого решения. Во втором случае средняя точность составляет 3 км, но при этом требования по точности независимого решения выполняются во всей зоне ответственности. Кроме того, фиксация радиуса круга для оптимизации (2000 км) не представляется рациональной, особенно при большом количестве антенн на СПОИ-СО.

С учетом перечисленных недостатков автором был разработан специальный алгоритм, позволяющий оптимизировать зону обслуживания СПОИ-СО.

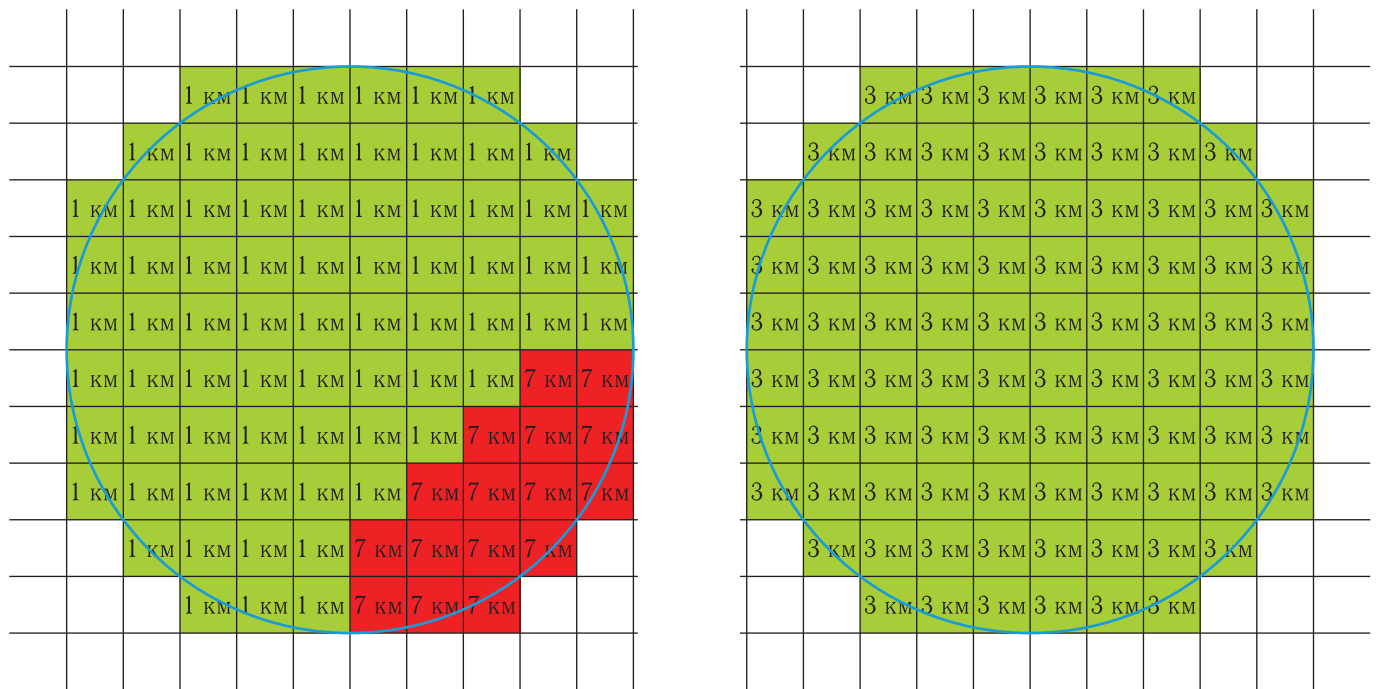


Рис. 1. Пример неправильного выбора комбинации спутников по критерию наилучшей средней точности

Алгоритм планирования, позволяющий оценить зону обслуживания СПОИ-СО

Зона обслуживания M -антенного СПОИ-СО аппроксимируется кругом с радиусом R . Требуется составить расписание слежения антенн СПОИ-СО за спутниками-ретрансляторами, обеспечивающий как можно больший радиус зоны обслуживания R_{\max} .

Такой круг наибольшего радиуса находится итерационным способом. На i -й итерации рассматривается круг радиусом R_i . Внутри этого круга имитируется работа равноудаленных друг от друга АРБ.

Затем на каждый j -й анализируемый момент времени производится полный перебор всех возможных комбинаций M из N_j видимых на данный момент спутников-ретрансляторов. Для каждого анализируемого АРБ в круге радиусом R_i при каждой рассматриваемой комбинации из M спутников вычисляется вероятность определения координат каждого АРБ с ошибкой не более 5 км (формулы для вычисления представлены в [1]) и выбирается созвездие, обеспечивающее наибольшее

количество мысленных АРБ в круге радиусом R_i , у которых такая вероятность составляет не менее 0,95.

Если есть несколько созвездий, для которых все анализируемые АРБ в круге радиусом R_i удовлетворяют этому условию, то выбирается любое из этих созвездий. Например, это можно сделать по критерию наилучшей средней точности (формулы расчета теоретической точности приведены в [4]) или наименьшего количества перевода антенн со спутника на спутник. Таким образом, выбираются созвездия на весь анализируемый интервал времени.

Затем для каждого имитируемого АРБ и для каждого набора спутников на j -й момент времени вычисляется вероятность определения координат и вероятность определения координат с точностью не хуже 5 км. Осредненные значения этих вероятностей за весь рассматриваемый интервал времени будут соответственно P_1 и P_2 . Если для этих вероятностей выполняются условия

$$\begin{cases} P_1 \geq 0,98 \\ P_2 \geq 0,95 \times P_1, \end{cases} \quad (1)$$

то эта точка включается в зону обслуживания СПОИ-СО. Если условия (1) выполняются для

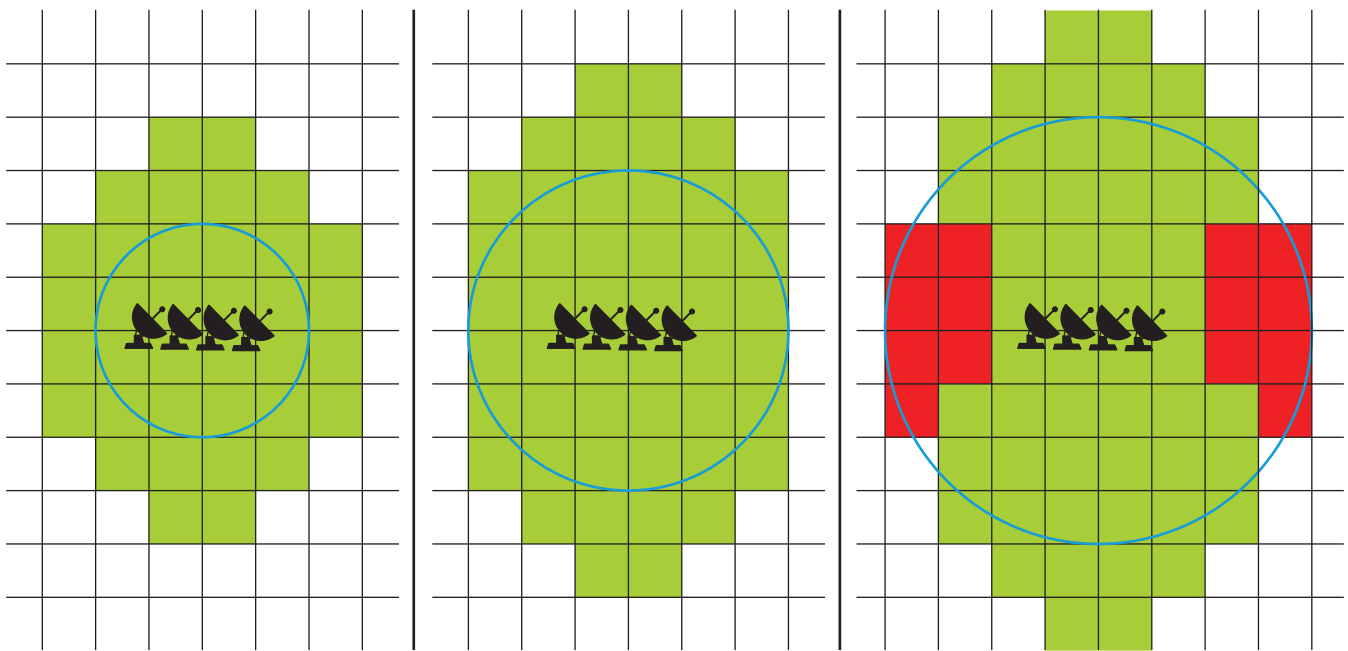


Рис. 2. Иллюстрация работы алгоритма на разных итерациях для СПОИ-СО, оборудованной 4 антеннами

всех имитируемых буев в круге R_i , то проделывается следующая итерация алгоритма с радиусом зоны обслуживания $R_{i+1} = R_i + \Delta R$. Если для какого-то АРБ из круга радиусом R_i не выполняются условия (1), то кругом наибольшего радиуса R_{\max} будет R_{i-1} .

В предлагаемом алгоритме на каждый момент времени выбирается комбинация спутников по критерию наибольшей одномоментной зоны покрытия внутри круга радиусом R_i , однако могут быть рассмотрены и другие критерии. Далее в статье будут показаны результаты работы этого алгоритма, где на каждый момент времени будет выбираться комбинация спутников по критерию наилучшего среднего геометрического фактора с учетом наличия медленно подвижных буев.

Таким образом, в результате выполнения этого алгоритма будет получено как расписание КА для наведения на них антенн, так и оценка зоны обслуживания. На рис. 2 приведен пример работы алгоритма на разных итерациях подбора зоны обслуживания для оптимизации в ней работы СПОИ-СО. Синий круг на каждой итерации — зона для оптимизации. Зеленым цветом обозначена зона обслуживания СПОИ-СО на каждой итерации, красным цветом — зона, которая должна входить в зону

обслуживания, однако требования СССПС в ней не выполняются. В данном примере на левом рисунке зона для оптимизации слишком мала, а на правом — слишком велика. Таким образом, зоной обслуживания будет зона, показанная на среднем рисунке.

Оценка величины зоны обслуживания существующих на данный момент СПОИ-СО

Для проверки возможности СПОИ-СО выполнения требований СССПС, оценки точности независимых решений и величины зоны обслуживания, а также оценки влияния медленно подвижных АРБ (скорость не превышает 5 м/с, особенности решения навигационной задачи в случае медленно подвижного АРБ можно найти в [5]) был проведен ряд моделирований. Общие для всех моделирований параметры представлены в табл. 1.

Так как на данный момент все станции СПОИ-СО имеют 4 или 6 антенн, то анализ зоны обслуживания СПОИ-СО именно таких конфигураций заслуживает внимания в первую очередь. В качестве местоположения моделируемой СПОИ-СО

Таблица 1. Параметры моделирования зоны обслуживания СПОИ-СО

Параметр	Критерий/Значение
Минимальный угол слежения СПОИ-СО за спутником, °	5
Количество излученных посылок АРБ	13
Время после получения первой посылки, после которого производится решение, мин	10
Длительность моделирования, дни	10
Шаг по времени, мин	15
Количество спутников для решения навигационной задачи	Не менее 3
σ ТОА	25 мкс (значение взято из [1])
σ ФОА	0,2 Гц (значение взято из [1])
Зависимость процента принятых посылок от угла места по линии АРБ-КА	70 % для углов места 5–75° для S-диапазона 70 % для углов места 5–83° для L-диапазона Только 9 первых посылок из 13 (1–9) считаются принятыми
Космический сегмент	Предполагаемый состав группировки на 2020 г. — 56 спутников

был выбран г. Кейптаун (ЮАР). Такой выбор обусловлен наличием в непосредственной близости как обширных водных акваторий, так и суши, что делает удобным сравнение характеристик производительности СПОИ-СО при работе по неподвижным и медленно подвижным АРБ. Все АРБ, находящиеся на суше, считались неподвижными, все АРБ, находящиеся на воде, — медленно подвижными под действием качки, ветра и течений.

При работе с подвижными АРБ (на море) по измерениям разностей ФОА требуется определять 5 параметров: долготу, широту и 3 компонента скорости (АРБ может иметь как горизонтальную скорость вследствие течения и ветра, так и вертикальную составляющую за счет качки). Поэтому 4-антенные СПОИ-СО при работе по медленно подвижным АРБ не могут использовать измерения ФОА и для таких АРБ местоположение вычисляется только по измерениям ТОА. При работе по неподвижным АРБ (на суше) при наличии измерений от 3 и более КА использовались измерения ТОА и ФОА.

На рис. 3 показаны результаты моделирования для 4-антенной СПОИ-СО.

Расписание составлялось по описанному в предыдущем разделе алгоритму. Проведенное моделирование показало, что требуемая точность 5 км в 95 % случаев не была достигнута на море ни в какой зоне, точность 5,5–10 км была достигнута в зоне 1500–2000 км. На суше точность составила 2–4 км в зоне около 2000 км.

Также моделирование было проведено для 6-антенной СПОИ-СО. При определении координат АРБ использовались измерения ТОА и ФОА как по неподвижным, так и по медленно подвижным буям. На рис. 4 приведены результаты проведенного моделирования зоны обслуживания для 6-антенной СПОИ-СО. На море точность 3–5 км была достигнута в радиусе 3000 км. На суше точность составила 2–4 км, причем радиус зоны обслуживания превысил 4000 км.

Таким образом, 6-антенная СПОИ-СО, в отличие от 4-антенной, способна выполнять требования СССПС как при работе с неподвижными АРБ, так и при работе по медленно подвижным АРБ. При работе с неподвижными АРБ радиус зоны обслуживания 6-антенной СПОИ-СО более чем 2 раза превышает радиус зоны обслуживания 4-антенной



Рис. 3. Зона обслуживания 4-антенной СПОИ-СО в г. Кейптауне (желтая и фиолетовая зоны)

СПОИ-СО (по площади зоны обслуживания более чем в 4 раза). Это приводит к важному выводу о низкой эффективности 4-антенных СПОИ-СО и невозможности их работы с требуемым качеством с медленно подвижным АРБ.

Моделирование зоны обслуживания в зависимости от алгоритма планирования и количества антенн на СПОИ-СО

Как отмечалось выше, величину зоны обслуживания СПОИ-СО можно увеличить за счет оптимизации алгоритма выбора спутников, для наведе-

дения на них антенн СПОИ-СО и за счет увеличения количества антенн на СПОИ-СО. С целью оценки величины зоны обслуживания СПОИ-СО в зависимости от этих параметров было проведено математическое моделирование. При этом были использованы следующие алгоритмы выбора КА для наведения на них антенн СПОИ-СО.

- Алгоритм №1 — алгоритм с выбором спутников-ретрансляторов с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО.
- Алгоритм №2 — алгоритм с полным перебором наборов спутников и выбором того набора, который предоставляет наилучшую одномоментную среднюю точность в зоне обслуживания. Зона обслуживания аппроксимируется кругом наибольшего

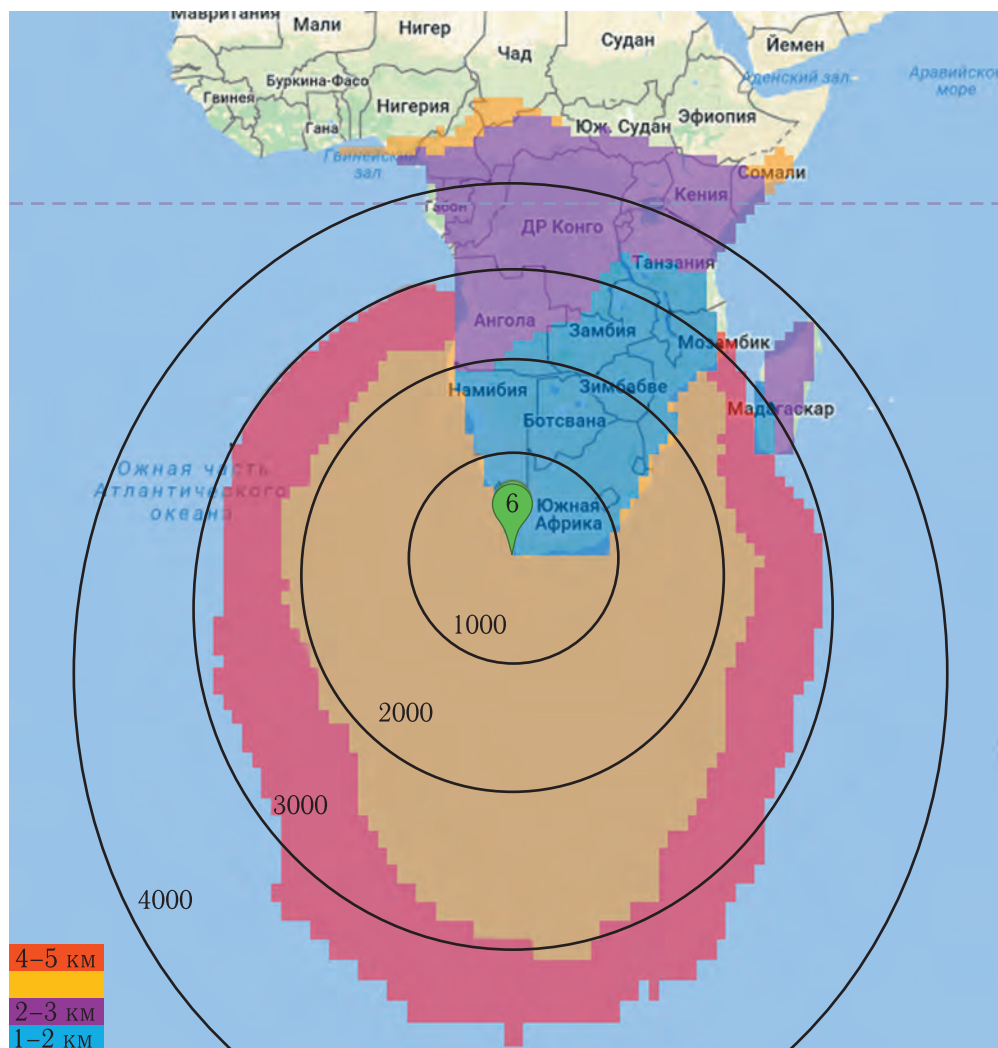


Рис. 4. Зона обслуживания 6-антенной СПОИ-СО в г. Кейптауне

радиуса обслуживания, его радиус находится итерационно.

- Алгоритм № 3 — алгоритм с полным перебором наборов спутников и выбором того набора, который предоставляет наибольшую одномоментную площадь внутри зоны обслуживания. Зона обслуживания аппроксимируется кругом наибольшего радиуса обслуживания, его радиус находится итерационно.

На рис. 5–8 показаны результаты проведенного моделирования. В зависимости от количества антенн для каждого алгоритма на рис. 5 показана величина зоны обслуживания (в % от земной поверхности), а на рис. 6 — величина радиуса круга, эквивалентного по площади зоне обслуживания СПОИ-СО.

Как видно из рис. 5 и 6, при количестве антенн, меньшем или равном 7, использование алгоритма № 1 приводит к нулевой зоне обслуживания. При 8 антеннах зона обслуживания более чем в 2 раза уступает зоне обслуживания, полученной по алгоритмам № 2 и № 3. При дальнейшем увеличении количества антенн разница в результатах работы этих алгоритмов уменьшается, но все же алгоритмы № 2 и № 3 всегда обеспечивают большую зону обслуживания, чем алгоритм № 1.

Алгоритм № 3 дает выигрыш в зоне обслуживания (до 10% от площади зоны обслуживания) относительно алгоритма № 2 при количестве антенн, меньшем или равном 10, однако при дальнейшем увеличении количества антенн оба алго-

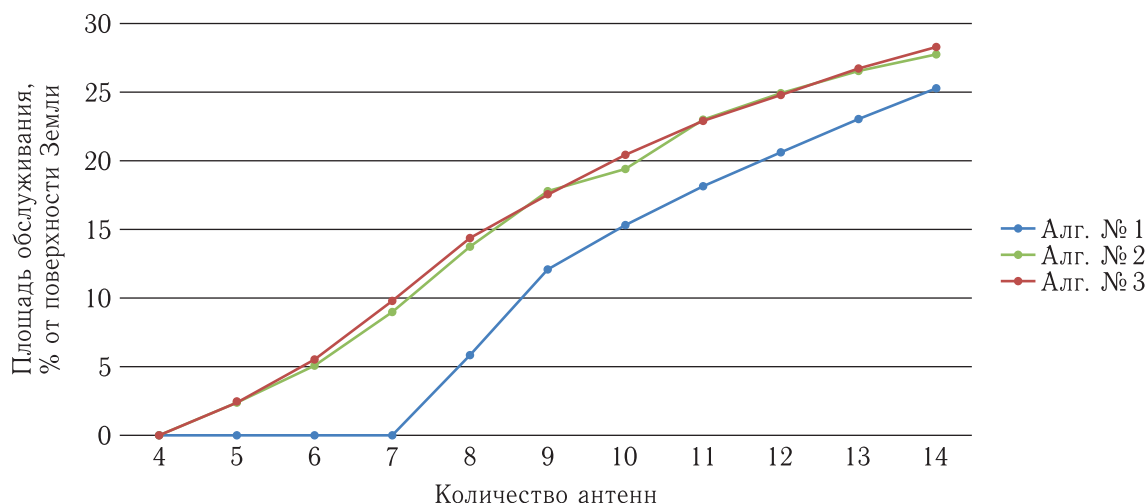


Рис. 5. Зависимость величины площади обслуживания СПОИ-СО от количества антенн в предположении, что все АРБ — подвижны

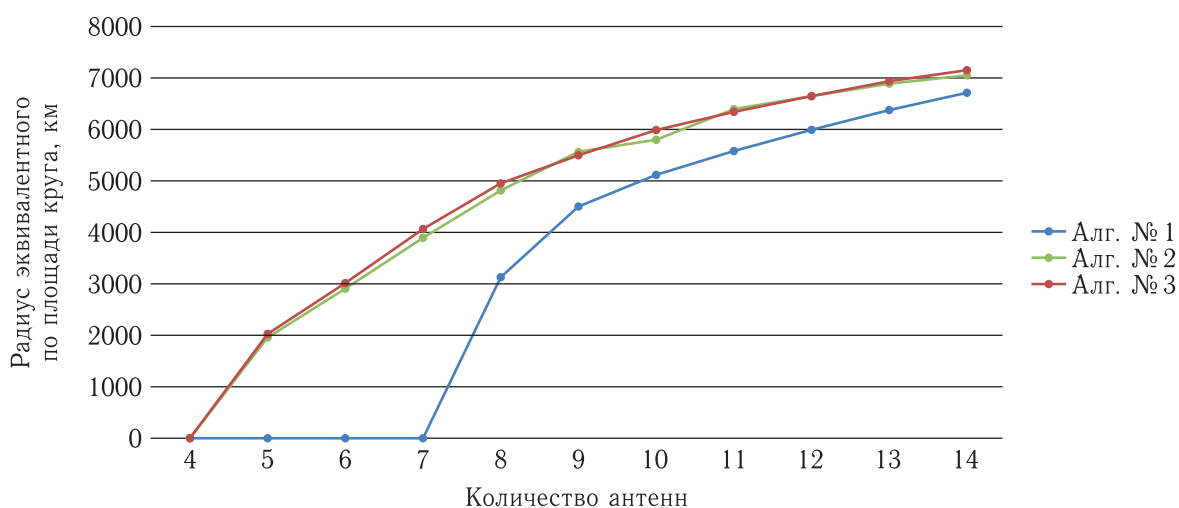


Рис. 6. Зависимость радиуса круга, эквивалентного по площади зоне обслуживания СПОИ-СО, от количества антенн в предположении, что все АРБ — подвижны

ритма предоставляют одинаковую по величине зону обслуживания.

На рис. 7 представлен график зависимости средней точности в зоне обслуживания в зависимости от количества антенн для каждого алгоритма планирования. Из этого графика видно, что алгоритм № 2 предоставляет несколько лучшую среднюю точность (до 15 % от требуемой точности) по сравнению с алгоритмом № 3.

На рис. 8 представлен график зависимости эффективности (площадь, приходящаяся на одну антенну) использования антенн СПОИ-СО для каждого алгоритма в зависимости от количества антенн.

Как видно из этих рисунков, существующие на сегодняшний день 6-антенные СПОИ-СО способны выполнять требования СССПС как для подвижных, так и для медленно подвижных буев (в круге радиуса около 3000 км), однако установка 6 антенн на СПОИ-СО не является эффективной. Если принять величину зоны обслуживания 6-антенного СПОИ-СО за единицу измерения, то добавление всего одной антенны увеличивает зону обслуживания на 78 %, двух антенн — на 162 %, трех антенн — на 220 %. Остальные значения приведены в табл. 2. При дальнейшем увеличении антенн эффективность их использования будет снижаться.

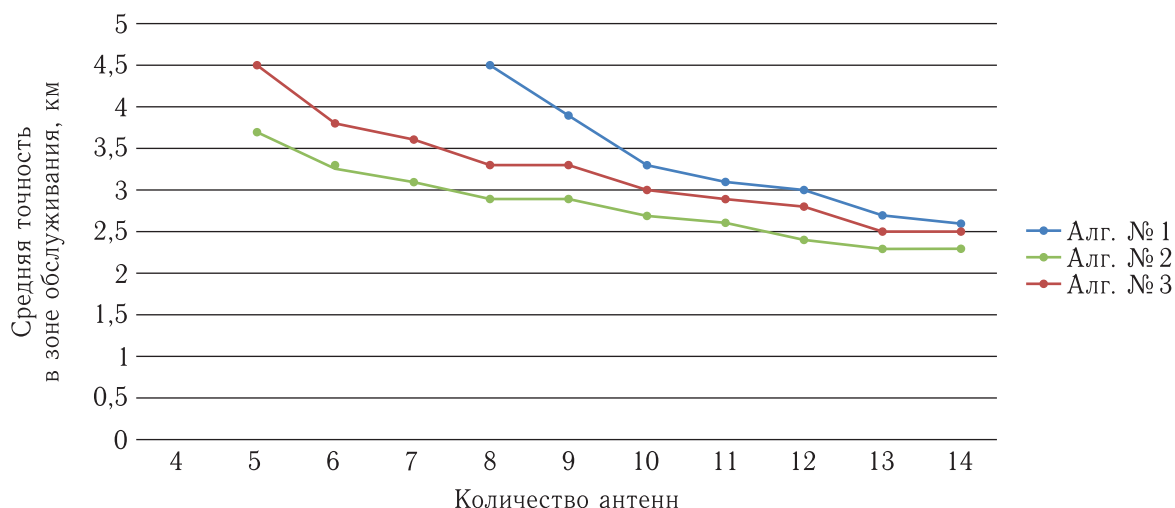


Рис. 7. Средняя точность в зоне обслуживания в предположении, что все АРБ — подвижны

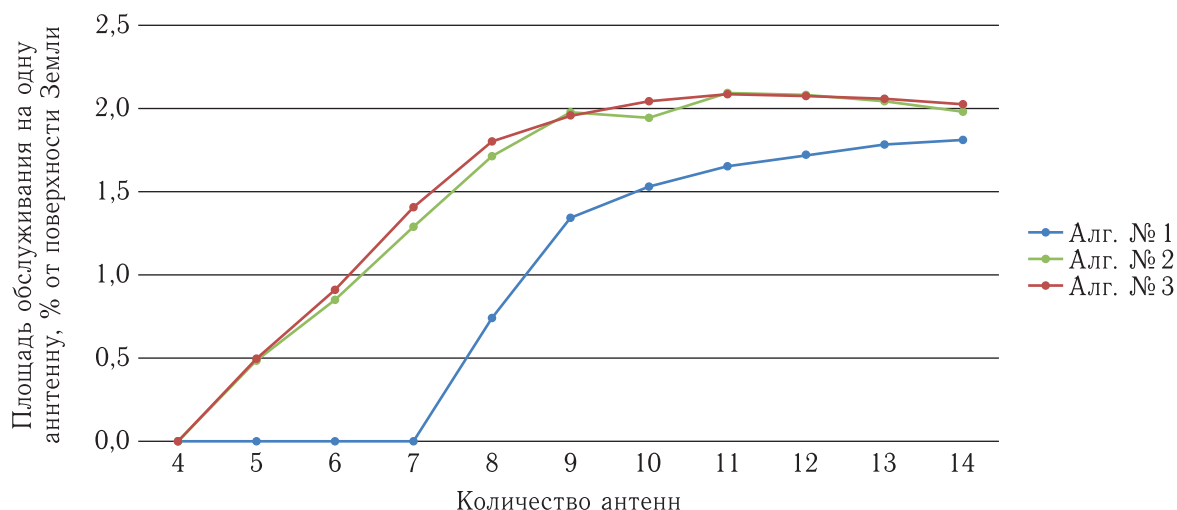


Рис. 8. Эффективность использования антенн СПОИ-СО в предположении, что все АРБ — подвижны

Количество антенн, устанавливаемое на СПОИ-СО, напрямую зависит от желаемой зоны обслуживания. Приведенные выше графики призваны оценить нужное количество антенн и дать оценку получаемой зоны обслуживания. При этом требуемое количество антенн может быть достигнуто как за счет установки антенн на СПОИ-СО, так и за счет обмена измерениями с соседними СПОИ-СО при условии их скоординированной работы.

Однако желаемая зона обслуживания может отличаться от круга, точность измерения времен и частот также может не совпадать с приведен-

ными в [1] значениями, также будут отличаться географические координаты СПОИ-СО и космический сегмент. На практике для каждой конкретной СПОИ-СО, зная ее параметры и желаемую зону обслуживания, следует проводить отдельные моделирования.

Выводы

В данной работе проведен анализ размера зоны обслуживания СПОИ-СО с различным количеством антенн при использовании различных

Таблица 2. Увеличение зоны обслуживания при добавлении антенн к 6-антенной СПОИ-СО

Количество антенн, добавляемых к 6-антенной СПОИ-СО	Получающееся количество антенн на СПОИ-СО	Увеличение зоны обслуживания в % относительно площади обслуживания 6-антенной СПОИ-СО
+1	7	+78 %
+2	8	+162 %
+3	9	+220 %
+4	10	+271 %
+5	11	+316 %
+6	12	+351 %
+7	13	+385 %
+8	14	+415 %

алгоритмов выбора спутников для наведения на них антенн СПОИ-СО с учетом наличия медленно подвижных буев.

Проведен анализ двух имеющихся алгоритмов выбора спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн СПОИ-СО, приведены их достоинства и недостатки. Среди недостатков следует особо выделить отсутствие учета наличия медленно подвижных буев и отсутствие оптимизации зоны обслуживания СПОИ-СО.

Предложен новый алгоритм планирования, обеспечивающий итерационную оптимизацию зоны обслуживания СПОИ-СО и учитывающий наличие медленно подвижных АРБ.

Выполнено математическое моделирование зоны обслуживания для конфигураций СПОИ-СО, существующих на данный момент (4 или 6 антенн). Это моделирование показало низкую эффективность 4-антенных СПОИ-СО и невозможность работы по медленно подвижным АРБ, в то время как 6-антенная СПОИ-СО продемонстрировала возможность выполнения требований как по неподвижным (в радиусе около 4500 км), так и по подвижным АРБ (в радиусе около 3000 км).

Проведен анализ зоны обслуживания СПОИ-СО в зависимости от количества антенн и трех алгоритмов планирования:

- алгоритм 1 — алгоритм с выбором КА с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО;
- алгоритм 2 — алгоритм с выбором набора спутников, обеспечивающим одномоментный наилучший геометрический фактор в круге максимального радиуса. Круг максимального радиуса находится итерационным способом;
- алгоритм 3 — алгоритм с выбором набора спутников, обеспечивающим одномоментную наибольшую зону обслуживания в круге максимального радиуса. Круг максимального радиуса находится итерационным способом.

По результатам моделирования алгоритм № 1 предоставляет зону обслуживания меньше, чем алгоритмы № 2 и № 3, что наиболее выражено при малом количестве антенн. При 12 и более антеннах проигрыш алгоритма № 1 составляет менее 20 % от зоны обслуживания.

Алгоритмы № 2 и № 3 приводят во многом к сходным результатам. При количестве антенн, меньшем 10, алгоритм № 3 дает некоторый выигрыш в зоне обслуживания (до 10 % от величины площади обслуживания), в то время как алгоритм № 2 приводит к выигрышу по средней точности в зоне обслуживания (до 15 % от требуемой точности).

Показано, что в автономном режиме наибольшей удельной эффективности (на одну антенну) СПОИ-СО достигает при установленных на ней 9–11 антеннах. Если принять величину зоны обслуживания 6-антенной СПОИ-СО за единицу измерения, то добавление всего одной антенны увеличивает зону обслуживания на 78 %, двух антенн — на 162 %, трех антенн — на 220 %.

Приведенные моделирования призваны дать оценку минимального количества антенн, требуемого для обеспечения покрытия обслуживания с заданными характеристиками в желаемой зоне покрытия. Отмечено, что нужное количество антенн может быть достигнуто за счет установки их на СПОИ-СО либо за счет обмена измерениями с соседними СПОИ-СО при условии координирования их работы.

Список литературы

1. COSPAS-SARSAT MEOLUT performance specification and design guidelines // C/S T.019, Issue 1, December 2015.

2. Canada/France/Russia/USA. EXPERTS WORKING GROUP ON MEOSAR FOC GLOBAL COVERAGE // CSC-57, Париж, 2017. http://cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/153/CSC-57-OPN-Inf-19.pdf. Дата обращения: 05.06.2017.
3. Антонов Д. В. Оптимальное планирование наведения на КА наземных антенн среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 4. С. 17–22.
4. Антонов Д. В., Федосеев А. В. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.
5. Антонов Д. В., Архангельский В. А., Белоглазова Н. Ю. Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.