

L. M. Liubina, A. Yu. Odintsov, M. I. Sugak  
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## CHU–MCLEAN RELATION BY INTEGRATION OF THE FINITE SPHERE

*Presented a new method of deriving the well-known relation Chu–McLean binding radius of the sphere around the electrically small antenna and maximum achievable quality factor. A derivation is simple and is based on the calculation of the flow Poynting vector through a sphere of finite radius and the formation of Q-factor, as the ratio of the real and imaginary part.*

**Electrically small antennas, Q-factor, unit sphere, ratio of Chu–McLean**

---

УДК 621.396.9

Р. В. Волков, В. В. Севидов  
Военная академия связи им. С. М. Буденного

А. О. Чемаров  
ООО НПП «Новые технологии телекоммуникаций»

## Точность геолокации разностно-дальномерным методом с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите

*Выделены перспективные направления применения геолокации. Показана необходимость разработки отечественных систем геолокации. Описан разностно-дальномерный метод геолокации. Обозначены основные факторы, влияющие на его точность. Проведено моделирование определения местоположения земных станций разностно-дальномерным методом геолокации, сформированы оценки точности для различных исходных данных. Приведена схема разработанного алгоритма и описана его работа по этапам. Сформулированы основные результаты исследований на основе разработанного алгоритма. Определены вопросы дальнейшего исследования.*

### **Геолокация, спутник-ретранслятор, земная станция, комплекс радиомониторинга, определение местоположения, разностно-дальномерный метод, координатометрия, источник радиоизлучения**

Существующие и перспективные системы спутниковой связи (ССС) обладают глобальной доступностью и огромной канальной и абонентской емкостью, что и предопределило их стремительное развитие за последние десятилетия. С помощью СССР возможно решение сложных для наземных систем задач в труднодоступных, малоосвоенных, малонаселенных регионах, а также на море по принципу «спутниковый мобильный радиосервис: глобально, всем и сразу» [1].

Попутно активно развиваются и сопутствующие радиосервисы, одним из которых выступает геолокация [2]. Под устоявшимся в научных и информационных изданиях термином «геолока-

ция» (*англ.* geolocation – определение местоположения (ОМП) на поверхности Земли) в рамках данной статьи понимается ОМП земных станций (ЗС) СССР по радиоизлучениям, принятым комплексом радиомониторинга (КРМ) от спутников-ретрансляторов (СР).

Выделяют некоторые перспективные направления применения геолокации. Так, геолокация в ряде случаев сможет дублировать или даже замещать спутниковую радионавигационную систему ГЛОНАСС, международную спутниковую поисково-спасательную систему «Коспас-Сарсат». Геолокация позволит операторам-владельцам СССР предотвратить нелегитимное использования

ЗС, а также адекватно решать вопросы, касающиеся оплаты трафика в зависимости от местоположения, в том числе пользователям ЗС, зарегистрированным за пределами Российской Федерации. Использование геолокации в качестве подсистемы в КРМ либо в комплексах деструктивного воздействия, позволит производить селекцию ЗС по территориальному принципу. Информация о местоположении ЗС позволит судить о количестве, составе и перемещении объектов, являющихся пользователями ССС. Кроме того ЗС могут выступать в качестве источников (генераторов) как преднамеренных, так и непреднамеренных помех. ОПМ таких ЗС позволит принимать меры для их нейтрализации.

Проведенный анализ патентов и научных статей показывает, что исследованиями в области геолокации активно занимаются в США, Великобритании, Японии, Германии и Франции. Различные организации ведут как теоретическую (оформление патентов, опубликование статей), так и практическую работу (разработка, продажа и эксплуатация систем геолокации). На постсоветском пространстве работы в области геолокации ведутся в России и на Украине.

В настоящее время отечественные системы геолокации не развернуты. Между тем нашли применение зарубежные системы. Например, в интересах радиочастотной службы РФ развернута система геолокации, элементы которой размещены в городах Смоленск и Белгород [3]. Основой данной системы являются аппаратура фирмы «Integral Systems». В ходе испытания системы геолокации в сентябре 2012 г. были вскрыты существенные недостатки, накладывающие ограничения на ее использование. Это в свою очередь стимулирует разработку отечественных систем геолокации.

Одним из методов геолокации является метод TDOA (англ. time difference of arrival – временная разность прибытия) [4]. По сути это есть не что иное, как разностно-дальномерный метод (РДМ) координатометрии (КМ), реализуемый в специфических условиях и ограничениях [5].

Несмотря на то что метод TDOA запатентован и в достаточной мере описан, самая сложная и дорогостоящая его составляющая – алгоритм ОПМ ЗС – представляет коммерческую тайну и не доступен даже ее пользователям.

Целью данной работы является разработка алгоритма РДМ геолокации, на основе теории разностно-дальномерных систем КМ, который в даль-

нейшем может быть использован для создания отечественной системы геолокации. В статье анализируются геометрические аспекты построения и функционирования системы геолокации без рассмотрения процессов обработки радиоизлучений.

Система геолокации, основанная на РДМ КМ, схематично представлена на рис. 1. Для описания работы такой системы следует рассмотреть сначала ее часть, состоящую из ЗС, обозначенной «I»; двух СР, обозначенных «S<sub>1</sub>» и «S<sub>2</sub>»; КРМ, обозначенного «K». С точки зрения функционирования ССС основным для ЗС будет лишь один СР – S<sub>1</sub>, обеспечивающий ретрансляцию радиосигналов. Второй СР – S<sub>2</sub>, называемый в иностранной литературе «смежным» (англ. adjacent), находится на некотором расстоянии от S<sub>1</sub> и способен, как правило, передать по боковому лепестку диаграммы направленности ЗС то же радиоизлучение, но с большим затуханием и с другой частотой переноса.

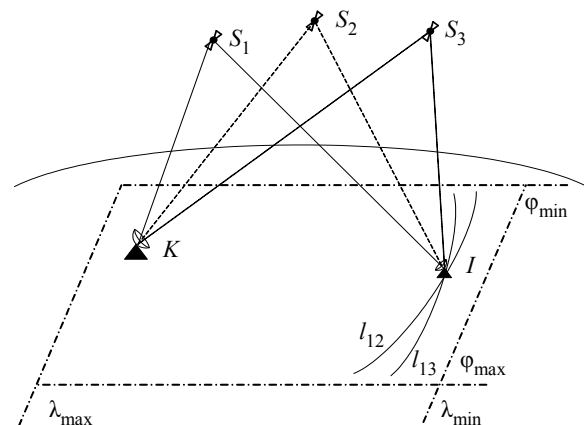


Рис. 1

Существенным для геолокации является тип орбит основного и смежного (-ых) СР. В рамках данной статьи в качестве ретрансляторов рассматриваются лишь СР на геостационарной орбите (ГСО). Между тем, следует отметить существование разработок в области геолокации на основе группировки низкоорбитальных малогабаритных космических аппаратов [6].

Для решения задачи геолокации необходимо преобразовать координаты КРМ, СР, ЗС в единую систему координат. Наибольшее распространение получили географическая система координат (ГСК) и декартова система координат (ДСК). Так, при определении объекта на поверхности Земли, либо в околоземном пространстве, удобно пользоваться ГСК. При этом в качестве координат выступают географическая широта  $\varphi$ , географическая долгота  $\lambda$  и высота над уровнем моря  $h$ .

Однако для производства расчетов, в частности нахождения расстояния между двумя точками пространства, удобнее пользоваться ДСК. При этом в качестве координат выступают проекции  $x, y, z$  на оси  $OX, OY, OZ$  соответственно.

Началом координат для ГСК и для ДСК служит центр массы Земли. Формулы пересчета координат из ГСК для точки на поверхности Земли в ДСК выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= \left( \frac{R_3}{\sqrt{1-e_3^2 \sin^2 \varphi}} + h \right) \cos \varphi \cos \lambda, \\ y &= \left( \frac{R_3}{\sqrt{1-e_3^2 \sin^2 \varphi}} + h \right) \cos \varphi \sin \lambda, \\ z &= \left( \frac{R_3}{\sqrt{1-e_3^2 \sin^2 \varphi}} + h \right) \sin \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_3 \approx 6\,378\,136$  м – радиус Земли на экваторе;  $e_3 \approx 0.081819$  – эксцентриситет эллипсоида Земли.

Применяя выражения (1) для СР, значение эксцентриситета  $e$ , следует приравнять к нулю.

В ДСК расстояние  $d_{12}$  между двумя произвольными точками пространства с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  рассчитывается по формуле

$$d_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (2)$$

Для позиционных систем КМ, в том числе и для разностно-дальномерных, широко применяются такие понятия, как координатно-информативный параметр (КИП); параметр (поверхность) положения (ПП) и линия положения (ЛП) [7].

КИП – один из физических параметров электромагнитного излучения, непосредственно измеряемый в системе КМ.

Параметром положения называется рассчитываемая системой КМ геометрическая величина, связанная однозначной зависимостью с КИП.

Геометрическое место точек на плоскости (в пространстве), для которых рассчитанный параметр положения постоянен, называется линией положения (поверхностью положения). В ряде случаев ПП служит поверхность Земли, если априори известно, что источник радиоизлучения (ИРИ) находится на ней. В пространстве ЛП считается также линия пересечения двух ПП.

В геолокации, использующей РДМ, в качестве КИП используется время задержки  $t'_{312}$ , вызванное разностью длин траекторий  $IS_1K$  и  $IS_2K$ ,

прошедших одним и тем же излучением ЗС через СР  $S_1$  и  $S_2$  и принятым в КРМ.

Зная координаты точек  $K, S_1,$  и  $S_2$ , согласно выражению (2) рассчитываются расстояния  $S_1K$  и  $S_2K$ . Далее вычисляется задержка во времени  $t_{312}$ , соответствующая разности длин отрезков  $IS_1$  и  $IS_2$ , по формуле  $t_{312} = t'_{312} - (S_1K - S_2K)/2$ , где  $c \approx 299\,792\,458$  м/с – скорость света. Тогда система геолокации представляется как разностно-дальномерная система с «условными измерителями» в точках с координатами  $S_1$  и  $S_2$ , составляющих гиперболическую базу  $S_1S_2$ . Параметром положения станет разность расстояний  $a_{12}$  между отрезками  $IS_1$  и  $IS_2$ , которую можно рассчитать по формуле  $a_{12} = t_{312}c$ .

ПП в этом случае будет двуполостный гиперболоид [8] с фокусами в точках  $S_1$  и  $S_2$ . Пересечение такого гиперболоида с поверхностью Земли образует ЛП  $l_{12}$  (см. рис.1).

Для работы системы геолокации на основе РДМ необходим еще как минимум один смежный СР  $S_3$  (см. рис. 1). Используя в расчетах координаты  $S_1$  и  $S_3$ , можно получить линию положения  $l_{13}$ . В свою очередь,  $l_{12}$  и  $l_{13}$  пересекаются в точке  $I$  с координатами, соответствующими координатам ЗС.

Из-за особенностей построения системы геолокации РДМ для СР на ГСО, возникает неоднозначность ОМП ЗС, так как линии положения  $l_{12}$  и  $l_{13}$  пересекаются в двух точках, что схематично показано на рис. 2, а. Так же на рис. 2, а цифрами 1, 2, 3 и 4 изображены подспутниковые точки СР  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$ . При этом одна точка пересечения  $I$  будет находиться в северном полушарии Земли, другая  $I'$  – в южном.

Введение еще одной точки измерения  $S_4$  (рис. 2, а) и возможность получения третьей ЛП  $l_{14}$  не устраняет неоднозначность при соблюдении следующих условий: 1) идеально ровная поверхность Земли; 2) абсолютно стабильные ГСО основного и смежных СР. Однако такие условия в реальности не достижимы, так как Земля имеет определенный рельеф с возвышенностями и низменностями, а смещение СР, даже суточное, может составлять единицы градусов.

Реальное положение дел схематично отражает рис. 2, б. Подспутниковые точки 1–4 имеют некоторую широту, что обеспечивает ненулевые углы

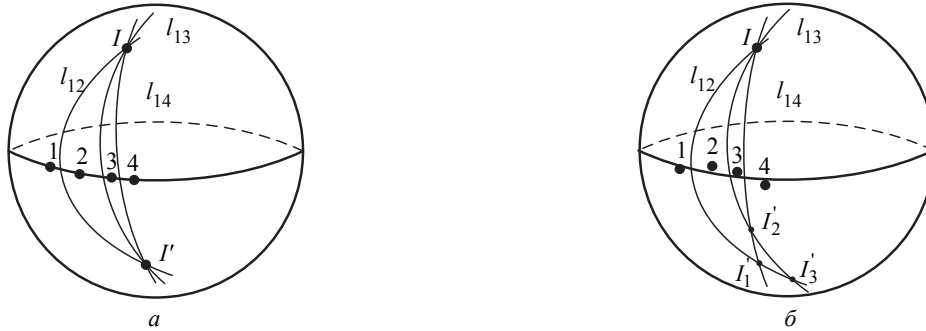


Рис. 2

между гиперболическими базами и как следствие искомая точка будет одна, а ложная преобразуется в пространственный треугольник на сфере  $I_1'I_2'I_3'$ .

Аналогичными рассуждениями можно показать, что неоднозначность ОМП ЗС можно устранить и по двум гиперболическим базам, производя измерения в течение определенного периода времени, за которое местоположение основного и смежных СР может измениться. Следует учитывать и априорные данные о ЗС. Например, может быть известно, что ЗС расположена на корабле либо на самолете. Такая информация может стать полезной при устранении неоднозначности.

Целесообразно ограничить рабочую зону системы геолокации на поверхности Земли как зону, в которой возможно нахождение ЗС. Рабочая зона системы геолокации не может выходить за границы рабочей зоны основного спутника  $S_1$  СССР. На рис. 1 рабочая зона ограничена минимальной и максимальной широтами  $\varphi_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$ , минимальной и максимальной долготами  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ .

Наибольшее влияние на точность системы геолокации РДМ оказывают следующие факторы:

- 1) топология системы, т. е. взаимное расположение КРМ, основного и смежных СР, ЗС;
- 2) ошибки измерения временных задержек, соответствующих расстояниям от ЗС до основного и смежных СР  $\sigma_{I_j}$  (где  $j = 1-3$  – номер СР), вызванные, например, погрешностями опорных генераторов частот, условиями распространения радиоволн и т. п.;
- 3) амплитуды отклонения основного и смежных СР от номинальных координат  $\sigma_{S_j\varphi}$ ,  $\sigma_{S_j\lambda}$ ,  $\sigma_{S_jh}$  (где  $j = 1-3$  – номер СР), называемых также качанием СР, вызванные неравномерными суточными притяжениями Солнца, Земли, Луны, неточным выводом СР на ГСО, а также другими причинами.

Для исследования всей рабочей зоны применен следующий подход: интервал  $\varphi_{\min}\varphi_{\max}$  разделен на  $N_\varphi$  равных частей, а интервал  $\lambda_{\min}\lambda_{\max}$  – на  $N_\lambda$  равных частей. При попарном переборе  $N_\varphi$  широт и  $N_\lambda$  долгот получаются координаты  $N_\varphi N_\lambda$  исследуемых точек, распределенных по рабочей зоне. В каждой из них рассчитывается ошибка ОМП ЗС.

Учитывая, что ошибки носят вероятностный характер, необходимо набрать определенную статистику. Для этого в каждой полученной точке необходимо повторить эксперимент  $N_3$  раз.

Для оценки точности геолокации РДМ с использованием СР на ГСО с учетом вышеизложенного разработан алгоритм ОМП ЗС, схема которого представлена на рис. 3.

Алгоритм имеет следующие этапы:

Этап 1. Ввод исходных данных. Исходными данными для разработанного алгоритма в соответствии с введенными обозначениями служат: 1) константы:  $R_3$ ,  $e_3$ ,  $c$ ,  $N_\varphi$ ,  $N_\lambda$ ,  $N_3$ ; 2) рабочая зона:  $\varphi_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$ ,  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ ; 3) координаты: КРМ, основного и смежных СР в ГСК; 4) ошибки:  $\sigma_{I_j}$ ,  $\sigma_{S_j\varphi}$ ,  $\sigma_{S_j\lambda}$ ,  $\sigma_{S_jh}$ , где  $j = 1-3$  – номер СР; 5) уровни дискретизации ошибок: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 8; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000 км; 6) начальные установки счетчиков циклов:  $k = 0$ ,  $m = 0$ ,  $p = 0$ .

Этап 2. Пересчет координат КРМ, СР в ДСК производится с помощью выражений (2). Далее они выступают в качестве номинальных.

Этап 3. Неравенством  $k > N_\varphi$  задается цикл перебора  $N_\varphi$  значений широты ЗС.

Этап 4. Счетчик  $k$ : при прохождении увеличивает значение  $k$  на 1.

Этап 5. Неравенством  $m > N_\lambda$  задается цикл перебора  $N_\lambda$  значений долготы ЗС.

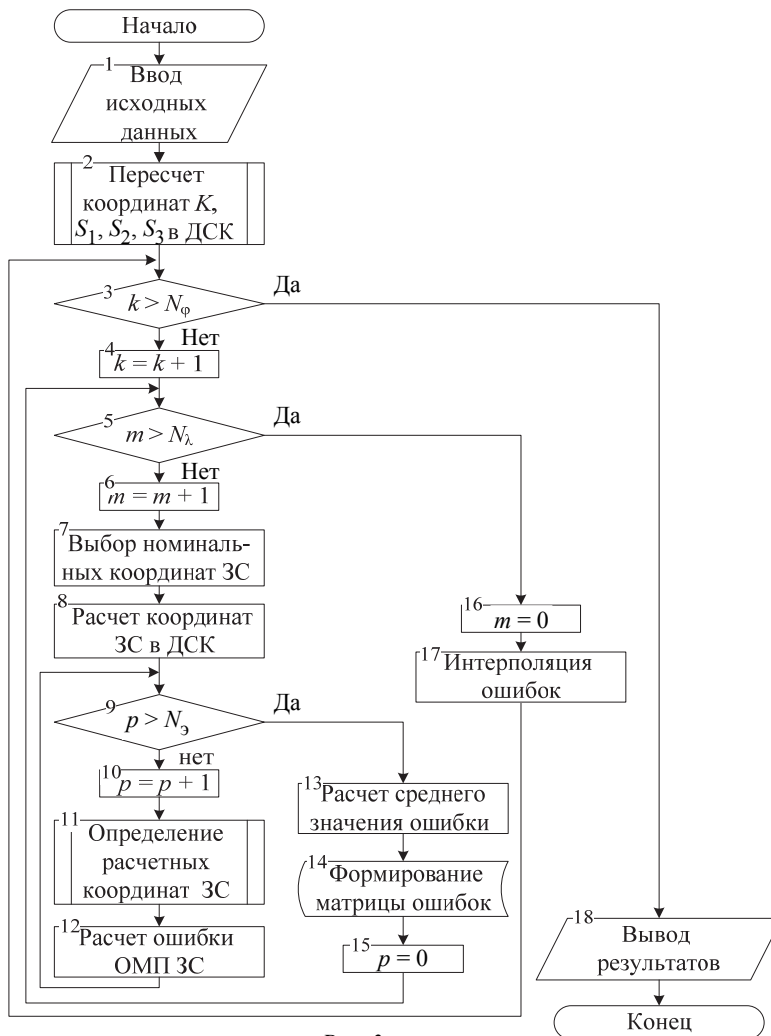


Рис. 3

Этап 6. Счетчик  $m$ : при прохождении увеличивает значение  $m$  на 1.

Этап 7. В соответствии с текущими значениями  $k$  и  $m$  выбираются координаты исследуемой точки рабочей зоны в ГСК. Эти координаты используются как номинальные координаты ЗС.

Этап 8. Расчет координат ЗС в ДСК производится с помощью выражений (2). В последующем эти координаты выступают в качестве номинальных.

Этап 9. Неравенством  $p > N_3$  задается цикл, в ходе которого эксперимент повторяется  $N_3$  раз.

Этап 10. Счетчик  $p$ : при прохождении увеличивает значение  $p$  на 1.

Этап 11. Определение расчетных координат ЗС разностно-дальномерным методом КМ. Эти координаты будут отличаться от номинальных (этапы 7 и 8), так как рассчитываются с учетом ошибок.

Определить координаты ЗС возможно методами численного поиска, легко реализуемыми на

современных вычислительных средствах. При его использовании реализуется следующий алгоритм:

1. Ввод приближенных значений координат ЗС –  $I'$ . В качестве приближенных значений координат ЗС выбираются центральные координаты рабочей зоны:  $\varphi_{I'} = (\varphi_{\max} + \varphi_{\min})/2$ ,  $\lambda_{I'} = (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})/2$ . Далее они преобразуются в ДСК с помощью выражений (2).

2. Для учета отклонений СР (качания СР) к номинальным координатам основного и смежных СР добавляются нормальные случайные составляющие среднеквадратических отклонений:  $\sigma_{S_j\varphi}$ ,  $\sigma_{S_j\lambda}$ ,  $\sigma_{S_jh}$ .

3. Расчет расстояния  $d'_{I'S_1}$ ,  $d'_{I'S_2}$ ,  $d'_{I'S_3}$  от приближенного значения координат ЗС  $I'$  до основного и смежных СР  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  по формуле (2). При этом каждое рассчитанное расстояние суммируется с соответствующей ошибкой измерения временных задержек  $\sigma_{I_j}$ , перемноженное на  $c$ .

4. Расчет разности расстояний относительно приближенного значения координат ЗС  $a'_{12}$  и  $a'_{13}$ :  $a'_{12} = d'_{1S_1} - d'_{1S_2}$ ,  $a'_{13} = d'_{1S_1} - d'_{1S_3}$ .

5. По аналогии с этапами 2–4 рассчитываются разности расстояний  $a_{12}$  и  $a_{13}$  относительно текущего номинального значения координат исследуемой точки. Таким образом,  $a_{12}$  и  $a_{13}$  являются параметрами положения, которые были бы получены в реальной РДМ-системе геолокации.

6. Определение вектора невязок, т. е. несоответствия между рассчитанными и номинальными разностями хода:  $\Delta_{12} = 2a_{12} - 2a'_{12}$ ,  $\Delta_{13} = 2a_{13} - 2a'_{13}$ .

7. Численный поиск расчетных координат ЗС, минимизирующих норму вектора невязок.

Этап 12. Расчет ошибки ОМП ЗС как расстояния между номинальными координатами ЗС (этап 8) и расчетными координатами ЗС (этап 11) с помощью выражений (2).

Этап 13. Усреднение ошибки ОМП ЗС по  $N_\varphi$  вычислениям.

Этап 14. Формирование матрицы ошибок размерностью  $N_\varphi \times N_\lambda$ . Ввод в память усредненной ошибки для каждой выбранной точки рабочей зоны.

Этап 15. Обнуление счетчика  $p$ : при прохождении присваивает  $p$  значение 0.

Этап 16. Обнуление счетчика  $m$ : при прохождении присваивает  $m$  значение 0.

Этап 17. Проводится интерполяция каждого элемента матрицы  $N_\varphi \times N_\lambda$ . При этом используются заданные в исходных данных уровни дискретизации.

Этап 18. Вывод результатов. Результаты выводятся в виде дискретного набора линий уровня ошибки в рабочей зоне. Примеры результатов трех

экспериментов представлены на рис. 4, *a–в*. В каждом фрагменте рисунка по оси абсцисс отложена долгота, по оси ординат – широта ЗС. Обозначения широт следующие: знак «+» означает северную широту, знак «-» – южную. Каждая из линий подписана числом, соответствующим уровню ошибки в километрах.

Разработанный алгоритм реализует многофакторный эксперимент, при проведении которого следует фиксировать все, кроме исследуемых величин. Предусмотрена возможность исследования влияния следующих факторов на точность системы геолокации РДМ с использованием СР на ГСО: 1) координат основного и смежных СР – для исследования влияния топологии системы геолокации на точность ОМП ЗС; 2) ошибок измерения временных задержек, соответствующих расстояниям от ЗС до основного и смежных СР – для обоснования требуемой точности опорных генераторов частот; 3) амплитуд отклонения СР от номинальных координат – для обоснования требований к подсистеме определения координат СР.

Как и предполагалось при нулевых ошибках  $\sigma_{I_j}$ ,  $\sigma_{S_j\varphi}$ ,  $\sigma_{S_j\lambda}$ ,  $\sigma_{S_jh}$  (где  $j = 1-3$  – номер СР), для любых положений основного и смежных СР; ошибка ОМП ЗС – нулевая в пределах всей рабочей зоны, что указывает на адекватность разработанного алгоритма ОМП ЗС.

В примерах, результаты которых представлены на рис. 4, *a, б, в*, зафиксированы долготы подспутниковых точек основного СР – 130° в. д. и двух смежных СР – 126° в. д., 134° в. д. соответственно, при одинаковой высоте ГСО всех трех СР над уровнем моря, составляющей 35 786 000 м.

На рис. 4, *a* изображены результаты первого эксперимента. В качестве исходных данных выбраны минимальные ошибки, составляющие  $\sigma_{I_1} = \sigma_{I_2} = \sigma_{I_3} = 5 \cdot 10^{-7}$  с,  $\sigma_{S_j\varphi} = \sigma_{S_j\lambda} = 0.0015^\circ$ ,

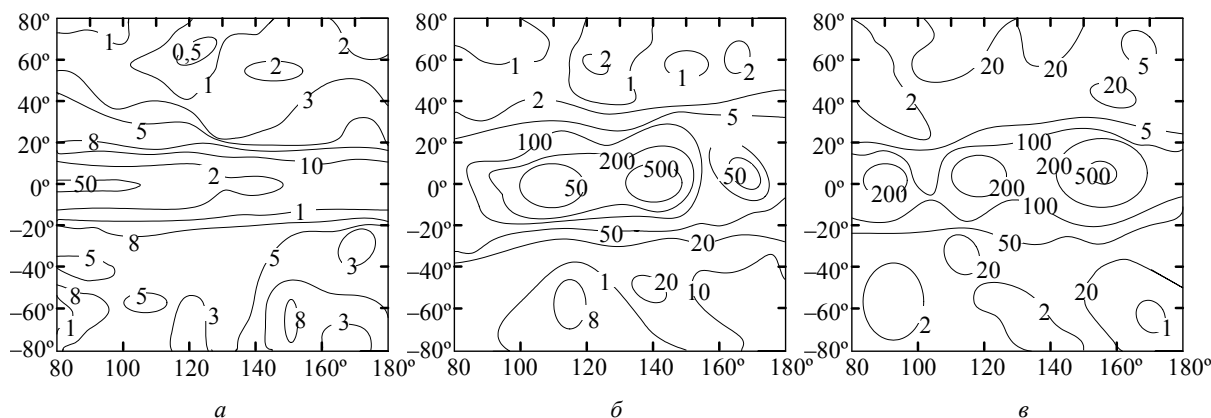


Рис. 4

$\sigma_{Sjh} = 1000$  м. В результате ошибки ОМП ЗС в границах рабочей зоны не превышают 10 км за исключением экваториальных широт.

На рис. 4, б изображены результаты второго эксперимента. В нем зафиксированы ошибки измерения расстояний от ЗС до СР из первого эксперимента:  $\sigma_{I_1} = \sigma_{I_2} = \sigma_{I_3} = 5 \cdot 10^{-7}$  с, а амплитуды отклонений СР увеличены на порядок до значений  $\sigma_{Sj\varphi} = \sigma_{Sj\lambda} = 0.015^\circ$ ,  $\sigma_{Sjh} = 10\,000$  м.

На рис. 4, в представлены результаты третьего эксперимента. В нем зафиксированы амплитуды отклонений СР из первого эксперимента:  $\sigma_{Sj\varphi} = \sigma_{Sj\lambda} = 0.0015^\circ$ ,  $\sigma_{Sjh} = 1000$  м, а ошибки измерения расстояний от ЗС до СР увеличены на порядок до значений  $\sigma_{I_1} = \sigma_{I_2} = \sigma_{I_3} = 5 \cdot 10^{-7}$  с.

На рис. 4, б, в прослеживается очевидная тенденция: при увеличении ошибок  $\sigma_{I_j}$ ,  $\sigma_{Sj\varphi}$ ,  $\sigma_{Sj\lambda}$ ,  $\sigma_{Sjh}$  увеличивается и ошибка ОМП ЗС. Также во всех экспериментах отмечается значительное увеличение ошибок ОМП ЗС в экваториальных широтах.

Анализ результатов экспериментов, выполненных на основе разработанного алгоритма, позволил сделать следующие выводы:

1. Получаемые с помощью разработанного алгоритма графики позволяют оценить ошибки разностно-дальномерного метода геолокации в пределах всей ее рабочей зоны.

2. Отмечено снижение точности ОМП ЗС в экваториальных широтах, обусловленное уменьшением угла пересечения линий положения, при приближении ЗС к экватору. Критичным в этом отношении выступает диапазон широт от  $20^\circ$  ю. ш. до  $20^\circ$  с. ш.

3. При выборе смежных СР системы геолокации необходимо найти компромисс между двумя противоречивыми условиями: с одной стороны, расстояние между основным и смежными СР необходимо увеличивать, поскольку это ведет к увеличению гиперболической базы и как следствие – к уменьшению влияния ошибок  $\sigma_{I_j}$ ,  $\sigma_{Sj\varphi}$ ,  $\sigma_{Sj\lambda}$ ,  $\sigma_{Sjh}$  на точность ОМП ЗС; с другой стороны, расстояние между основным и смежными СР необходимо уменьшать, так как смежные СР ретранслируют радиоизлучения принятые с направлений, соответствующих боковым лепесткам ЗС. Рациональным при использовании СР на ГСО представляется выбор смежных СР, отстоящих на  $3...6^\circ$  от основного СР.

4. Получены примерные значения приемлемых максимальных амплитуд отклонений основного и смежных СР, составляющие:  $\sigma_{Sj\varphi} = \sigma_{Sj\lambda} = 0,03^\circ$ ,  $\sigma_{Sjh} = 20\,000$  м.

Завершение данного исследования не закрывает рассматриваемую тему. Дальнейшему исследованию подлежат следующие вопросы:

- 1) проектирование систем геолокации различающихся по методу ОМП ЗС и по типу орбит СР;
- 2) обоснование требований к точности подсистемы определения координат СР;
- 3) обоснование требуемой точности опорных генераторов частот КРМ;
- 4) исследование доплеровского метода геолокации;
- 5) возможность уменьшения ошибок ОМП ЗС в экваториальных широтах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чельшев В. Д, Якимовец В. В. Радиоэлектронные системы органов административного и военного управления. Ч. 1: Радиоинтерфейсы систем мобильно-гордиосервиса: учеб. СПб.: ВАС, 2006. 576 с.

2. Evans B. G. Satellite communication systems / 3rd edition (Editor). Institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom, 2008. P. 613–614.

3. В России введена в строй система геолокации. URL: <http://rkn.gov.ru/news/rsoc/news16618.htm>.

4. Pat 5570099 US, G01S 003/16 TDOA/FDOA technique for locating a transmitter / DesJardins G. A. № 138154; Filed Oct. 15, 1993; et al. Oct. 29, 1996.

5. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии ис-

точников радиоизлучений / Р. В. Волков, С. В. Дворников, В. Н. Саяпин, А. Н. Симонов. СПб.: ВАС, 2013. 116 с.

6. Вознюк В. В., Зайцев С. А. Космическая система радиотехнического мониторинга на основе группировки низкоорбитальных малогабаритных космических аппаратов // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 26–30.

7. Дворников С. В., Саяпин В. Н., Симонов А. Н. Теоретические основы координатометрии источников радиоизлучений. СПб.: ВАС, 2007.

8. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: Астрель АСТ, 2002. С. 246–248.

R. V. Volkov, V. V. Sevidov

*Military telecommunications academy named of S. M. Budyonny*

A. O. Chemarov

*«New telecommunication technologies» company*

## GEOLOCATION ACCURACY RANGE-DIFFERENCE METHOD USING RELAY SATELLITES IN GEOSTATIONARY ORBIT

*Highlighted in advanced applications of geolocation. Shows the need to develop domestic systems geolocation. Described rangedifference method geolocation. Identified the main factors affecting the accuracy rangedifference method geolocation. The simulation of the positioning of earth stations time-rity-ranging method geolocation formed assess the accuracy for different input data. Shows the scheme ma-developed algorithm and its work is described in stages. The basic results of the studies on the basis of the algorithm. Identified issues for further research.*

**Geolocation, relay satellite, ground terminal, complex of radio monitoring, location, range-difference method, koordinatometriya, radio source**

---