



УДК 621.396.9

В. В. Севидов

*Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного
(Санкт-Петербург)*

А. О. Чемаров

ООО НПП "Новые технологии телекоммуникаций" (Санкт-Петербург)

Определение координат спутников-ретрансляторов в разностно-дальномерной системе геолокации

Указано на возникновение и развитие геолокации как составной части радиомониторинга спутниковых линий связи. Обозначена основополагающая предпосылка функционирования системы геолокации. Раскрыта разностно-дальномерная система геолокации, описан алгоритм ее функционирования. Показаны преобразования координат в интересах геолокации. Обозначены основные факторы, влияющие на точность разностно-дальномерной системы геолокации. Исследован суммарно-дальномерный метод определения координат спутников-ретрансляторов.

Геолокация, спутник-ретранслятор, земная станция, координатометрия, комплекс радиомониторинга, определение местоположения, разностно-дальномерная система, суммарно-дальномерный метод

Стремительное развитие спутниковой связи [1] способствовало возникновению геолокации [2], которая является составной частью радиомониторинга спутниковых линий связи. Под термином "геолокация" (geolocation) в рамках настоящей статьи понимается процесс определения местоположения (ОМП) земных станций (ЗС) систем спутниковой связи (ССС) по излучениям, принятым от спутников-ретрансляторов (СР).

Мировым лидером в геолокации на сегодняшний день признаны США [3]. Активные исследования по ОМП ЗС также ведутся в Великобритании, Японии, Германии и Франции [3]. В Российской Федерации в интересах радиочастотной службы на базе аппаратуры и технологии фирмы "Integral systems" развернута система геолокации, элементы которой размещены в Смоленске и Белгороде. Наряду с этим в ведущих научных, учебных и производственных организациях идут работы по созданию отечественной системы геолокации.

Основополагающей предпосылкой функционирования системы геолокации является наличие помимо основного СР, через который организуется канал связи, так называемого смежного (adjacent) СР, ретранслирующего те же самые радиоизлуче-

ния, что и основной, но с большим ослаблением, на другой частоте переноса [2], [3]. Используя основной и смежный СР в качестве опорных точек, ОМП ЗС может выполняться, например, разностно-дальномерным методом координатометрии (КМ), реализуемым в специфических условиях и ограничениях [4]. При этом предъявляются специфические требования к точности и оперативности определения координат основного и смежного СР, что предполагает наличие соответствующей подсистемы.

В настоящей статье представлены результаты имитационного моделирования подсистемы определения координат СР в разностно-дальномерной системе (РДС) геолокации, которые в дальнейшем могут быть использованы для создания отечественной системы геолокации. В статье анализируются в основном геометрические аспекты построения и функционирования системы геолокации без подробного рассмотрения процессов обработки радиосигналов.

Существенным для геолокации является тип орбит основного и смежных СР. В рамках настоящей статьи в качестве ретрансляторов рассматриваются лишь СР на геостационарной орбите (ГСО). Однако большинство рассматриваемых положений характерны и для других типов орбит.

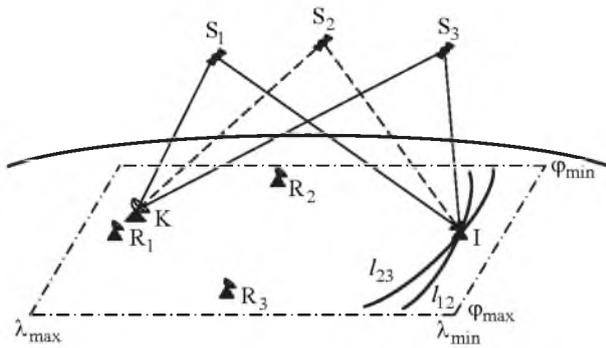


Рис. 1

РДС геолокации, представленная схемой на рис. 1, включает: К – комплекс радиомониторинга (КРМ); I – ЗС; S₁ – основной и S₂, S₃ – смежные СР (для одномоментного ОМП ЗС, находящейся на земной поверхности, необходимо и достаточно трех СР); R₁, R₂ и R₃ – реперные станции (РС).

Исследуемая зона системы геолокации, связанная с рабочими зонами основного и смежных СР, ограничена минимальной и максимальной широтами (φ_{min}, φ_{max}) и минимальной и максимальной долготами (λ_{min}, λ_{max}).

Разность длин траекторий IS₁K и IS₂K порождает временную задержку t'₃₁₂, обусловленную прохождением одной и той же реализации радиосигнала ЗС через СР S₁ и S₂. При известных координатах К, S₁ и S₂ рассчитывается временная задержка t₃₁₂ относительно точек пространства с координатами СР S₁ и S₂. Такие точки считают "условными измерителями", а отрезок S₁S₂ составляет гиперболическую базу РДС. Параметром положения является разность расстояний между отрезками IS₁ и IS₂:

$$2a_{12} = t_{312}c,$$

где c ≈ 3·10⁸ м/с – скорость света.

Поверхностью положения в этом случае будет двуполостной гиперboloид [5] с фокусами в точках S₁ и S₂, параметры которого однозначно определяются длиной гиперболической базы и временем задержки. Пересечение такого гиперboloида с поверхностью Земли образует линию положения l₁₂ (рис. 1).

Аналогично, используя СР S₂ и S₃, можно получить линию положения l₂₃. Эти линии пересекаются в точке I, соответствующей координатам ЗС.

Для решения задачи геолокации необходимо преобразовать координаты КРМ, основного и смежных СР, ЗС и трех РС в единую систему координат. В КМ наибольшее распространение получили географическая система координат (ГСК) и декартова система координат (ДСК). Так, при позиционировании объекта на поверхности Земли либо в околоземном пространстве удобно пользоваться ГСК. Началом координат для ГСК служит центр Земли, а в качестве координат выступают географическая широта (φ), географическая долгота (λ) и высота над уровнем моря (h).

Однако для производства расчетов, в частности для нахождения расстояния между двумя точками пространства, удобнее пользоваться ДСК, в которой начало координат 0 совмещено с центром Земли, ось X направлена на Гринвич, ось Z – на север, ось Y дополняет систему координат до правой. Координатами объекта в ДСК являются его проекции x, y, z на оси 0X, 0Y, 0Z соответственно.

Кроме того, положение СР, обращающихся по эллиптическим орбитам, часто определяют в геоцентрической декартовой орбитальной системе координат (ОСК), в которой начало координат 0 совмещено с центром Земли, ось ξ направлена по линии апсид, ось ζ – по нормали к плоскости орбиты СР, ось η дополняет систему координат до правой (рис. 2) [6]. В ОСК координатами СР S являются его проекции на оси 0ξ, 0ζ, 0η, обозначаемые ξ_S, ζ_S и η_S.

Формулы пересчета координат из ГСК в ДСК выглядят следующим образом:

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

где R₃ ≈ 6378 км – радиус Земли на экваторе; e₃ ≈ 0.081819 – эксцентриситет Земли.

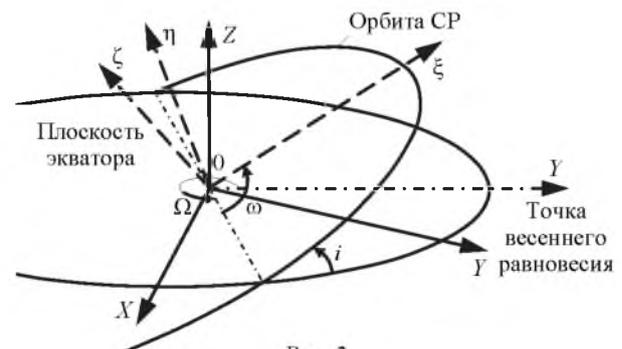


Рис. 2

Переход от ОСК к ДСК осуществляется центроаффинным преобразованием с помощью девятичисленной матрицы [6]:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \cos i \sin \omega & -(\cos \Omega \sin \omega + \sin \Omega \cos i \cos \omega) & \sin \Omega \sin i \\ \cos \Omega \cos i \sin \omega + \sin \Omega \cos \omega & -(\sin \Omega \sin \omega - \cos \Omega \cos i \cos \omega) & -\sin \Omega \sin i \\ \sin i \sin \omega & \sin i \cos \omega & \cos i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix},$$

где ω – аргумент перицентра; Ω – долгота восходящего узла; i – наклонение, представляющие собой кеплеровские элементы орбиты.

В качестве одной из важнейших характеристик РДС геолокации является ее точность, на которую влияют следующие факторы [7]:

- топология РДС;
- погрешности опорных генераторов частот основного и смежных СР, КРМ;
- отношения "сигнал/шум" на входах радиоприемных устройств КРМ, основного и смежных СР;
- условия распространения радиосигналов на трассах IS₁K и IS₂K;
- ошибки определения координат основного и смежных СР, вызванные их отклонением от номинальных координат ("качанием СР") из-за неравномерности суточного притяжения Солнца, Земли и Луны, неточного вывода СР на ГСО, а также других причин.

Перечисленные факторы приводят к суммарной ошибке σ_{Σ} измерения разности временных задержек прохождения одной и той же реализацией радиосигнала ЗС через СР S₁ и S₂, что, в свою очередь, вызывает ошибку ОМП ЗС.

Топология РДС определяется взаимным расположением основного и смежных СР, ЗС, КРМ.

При выборе смежных СР РДС геолокации необходимо найти компромисс между двумя противоречивыми условиями. С одной стороны, расстояние между основным и смежными СР необходимо увеличивать, так как это ведет к увеличению гиперболической базы и, как следствие, к уменьшению влияния ошибок определения координат основного и смежных СР 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 ОМП ЗС системы VSAT¹ представляется выбор смежных СР, отстоящих по долготе на 3...6° от основного СР.

Координаты ЗС могут быть любыми в рамках границ рабочей зоны РДС геолокации.

Расположение КРМ влияет на точность системы геолокации только через значения отношений "сигнал/шум" для принимаемых радиоизлучений основного и смежных СР. Таким образом, следует выбирать позицию КРМ в зонах максимальной радиовидимости указанных СР.

На современном этапе развития технологий погрешности опорных генераторов частот основного и смежных СР, КРМ могут составлять от 10⁻² нс для рубидиевых до 10² нс для кварцевых генераторов.

Отношения "сигнал/шум" на входах радиоприемных устройств КРМ, основного и смежных СР зависят от многочисленных параметров, носят вероятностный характер и способны вносить дополнительную ошибку измерения задержки для используемых в спутниковых системах связи сигналов и типовой аппаратуры до 5 мкс.

Анализ условий распространения радиосигналов на трассах IS₁K и IS₂K показывает, что существенный вклад в ошибку измерения временной задержки вносят тропосфера и ионосфера [8]. Так, рефракция, возникающая при прохождении тропо- и ионосферы, вносит дополнительную задержку в распространение радиосигналов по указанным траекториям и зависит от ряда условий, например от угла места основного и смежных СР с позиций ЗС и КРМ, давления, температуры, влажности воздуха и т. д.

Дополнительная задержка радиосигнала в тропосфере может быть оценена с использованием одной из моделей, наиболее распространенными из которых являются модели Хопфильда (Hopfield) и Саастмоинена (Saastamoinen) [8]. Дополнительная задержка радиосигнала в рассматриваемой РДС на каждой из трасс IS₁ и IS₂ может достигать 16...160 нс, что соответствует погрешности измерения дальностей 4.8...48 м.

Ионосфера – область атмосферы, содержащая значительное число свободных электронов (более 1000 см⁻³), что обуславливает ее диспергирующие свойства. Дополнительная задержка радио-

¹ VSAT – very small aperture terminal – земная станция с малой апертурой антенны [1].

сигнала в ионосфере может быть оценена с помощью модели International Reference Ionosphere (IRI-95) [8] и, например для диапазона частот Ku, достигает 30 нс ночью и 150 нс днем, что соответствует погрешности измерения дальностей 9 и 45 м.

По аналогии со спутниковыми радионавигационными системами при компенсации дополнительных задержек в тропо- и ионосфере целесообразно использовать псевдодальности – расстояния от ЗС I (рис. 3) до воображаемых точек S'_j , $j = \overline{1, 3}$, находящихся на тех же прямых, что и СР S_j , но отстоящих от них на расстояния, равные произведениям указанных дополнительных задержек на скорость света.

Для определения координат основного и смежных СР могут быть использованы расчеты с использованием данных формата TLE², который определен группировкой NORAD и используется в NORAD, NASA и других системах [9]. TLE рассчитываются для многих тысяч космических объектов и свободно распространяются в Интернете для дальнейшего использования. При этом ошибка определения координат СР с использованием данных формата TLE ведет к ошибке расчета наклонной дальности до СР и, как следствие, к ошибке расчета времени задержки радиосигнала на соответствующей трассе, которая для СР на ГСО может составлять 3 мкс, что соответствует погрешности измерения наклонной дальности 900 м.

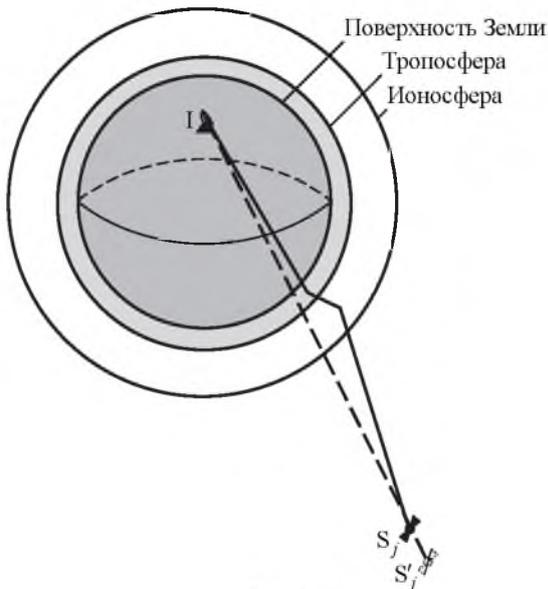


Рис. 3

² TLE – two line element – двухстрочный набор элементов.

Расчеты координат СР с использованием данных формата TLE приемлемы лишь для РДС геолокации, где ЗС имеет ненаправленную антенну и, как следствие, есть возможность выбора смежных СР на значительных расстояниях от основного. Увеличение гиперболической базы в этом случае ведет к уменьшению влияния ошибок определения координат СР на точность ОМП ЗС.

Точность подсистемы определения координат СР с помощью TLE недостаточна для системы геолокации, когда в качестве объекта ОМП выступает ЗС типа VSAT. В этом случае выбор смежных СР, отстоящих по долготе на $3...6^\circ$ от основного, обуславливает малую гиперболическую базу, компенсировать которую возможно повышением точности подсистемы определения координат СР.

Таким образом, суммарная ошибка σ_Σ измерения задержки распространения радиосигнала носит случайный характер и может достигать 10 мкс, что соответствует погрешности измерения дальности 3000 м.

Для уменьшения суммарной ошибки σ_Σ предлагается использовать суммарно-дальномерный метод определения координат СР по сигналам как минимум трех опорных реперных станций (ОРС) R_1, R_2, R_3 (рис. 4). Одну из них, например R_1 , можно выделить в качестве центральной, тогда совместно с двумя другими образуются базы ОРС R_1R_2 и R_1R_3 . Основу суммарно-дальномерного метода определения координат СР можно описать на примере первого СР следующим алгоритмом:

1. В момент времени, в который необходимо определить координаты S_1 , все ОРС излучают известные радиосигналы.

2. В КРМ измеряются времена прохождения радиосигналами траекторий R_1S_1K, R_2S_1K и R_3S_1K .

3. Умножением измеренных времен на скорость света (c) получают длины соответствующих траекторий. Эти длины являются координатно-информативными параметрами, а поверхностями положения будут эллипсоиды A_1, A_2 и A_3 (рис. 4) [5]. Первый фокус всех трех эллипсоидов совпадает с точкой К, вторые фокусы каждого эллипсоида располагаются в точках R_1, R_2 и R_3 соответственно.

4. Определяются координаты S_1 как координаты точки пересечения поверхностей A_1, A_2 и A_3 . Неоднозначность, обусловленная использованием трех, а не четырех поверхностей положения и вы-

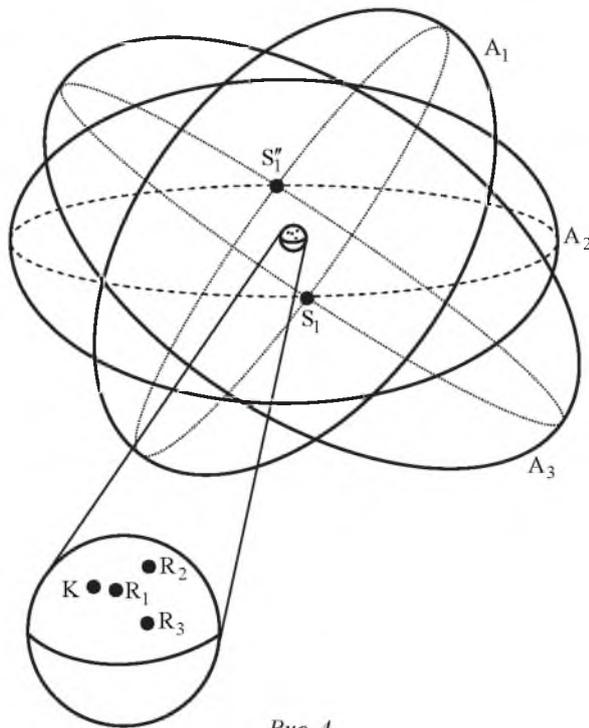


Рис. 4

раженная появлением аномальной точки S_1'' , устраняется априорным знанием координат СР с большой погрешностью, полученных с использованием данных формата TLE либо другим способом.

Этим же алгоритмом определяются координаты остальных СР РДС геолокации.

При определении координат СР суммарно-дальномерным методом и допущении, что сигнал ЗС проходит примерно такую же радиотрассу, что и сигналы ОРС, компенсируется большинство систематических ошибок, например вызванных рефракцией при прохождении тропосферы и ионосферы, что является существенным преимуществом.

С помощью имитационного моделирования оценена эффективность предлагаемой подсистемы определения координат СР. Выполнено сравнение трех РДС геолокации. В первом варианте РДС координаты СР задавались с ошибками, соответствующими расчетам с использованием данных формата TLE, что привело к суммарной ошибке измерения времен распространения радиосигналов 10 мкс. Во втором и третьем вариантах координаты СР определялись суммарно-дальномерным методом по сигналам ОРС, за счет чего суммарная ошибка измерения времен распространения радиосигналов уменьшалась до 3 и 2 мкс соответственно. Различие второго и третьего вариантов состояло лишь в конфигурации баз ОРС.

При равных расстояниях между ОРС, составляющих 1000 км, во втором варианте они располагались в треугольнике с углами 160, 10 и 10°, а в третьем – в треугольнике с углами 90, 45 и 45°.

Для всех моделируемых вариантов систем фиксировались общие параметры:

– долготы подспутниковых точек основного СР 130° в. д. и двух смежных СР 126° в. д., 134° в. д., при одинаковой высоте ГСО всех трех СР над уровнем моря, составляющей 35 786 км;

– рабочая зона ограничена минимальной и максимальной широтами $\varphi_{\min} = 80^\circ$ ю. ш., $\varphi_{\max} = 80^\circ$ с. ш., минимальной и максимальной долготами $\lambda_{\min} = 80^\circ$ в. д., $\lambda_{\max} = 180^\circ$ в. д.;

– координаты КРМ: $\varphi_{\max} = 60^\circ$ с. ш., $\lambda_{\min} = 30^\circ$ в. д.

Результаты сравнения представлены на рис. 5 в виде графиков, соответствующих первому (а), второму (б) и третьему (в) вариантам РДС. В каждом из графиков по оси абсцисс отложена долгота, по оси ординат – широта ЗС. Контурами соединены точки рабочей зоны, для которых значения ошибок ОМП ЗС равны. Эти контуры обозначены цифрами, соответствующими номиналам ошибок ОМП ЗС в километрах.

В результате проведенного исследования установлено, что ошибки ОМП ЗС в РДС, в которой координаты основного и смежных СР рассчитываются с использованием данных формата TLE, составляют сотни километров, что в большинстве случаев неприемлемо. Реализация подсистемы определения координат СР с использованием трех ОРС значительно улучшает точность РДС геолокации за счет приведения суммарной ошибки σ_{Σ} измерения времен распространения радиосигналов практически только к шумовой составляющей.

В ходе исследования выработаны требования к подсистеме определения координат СР, которые могут стать полезными для создания отечественной РДС геолокации:

1. Базы ОРС должны быть максимальны, при этом все ОРС должны оставаться в зонах радиовидимости основного и смежных СР. Рациональным представляется выбор баз ОРС порядка 1000 км. Допустимо один из ОРС располагать в позиционном районе КРМ.

2. Максимальная точность ОМП ЗС (минимальная ошибка определения координат СР) достигается при условии ортогональности баз ОРС.

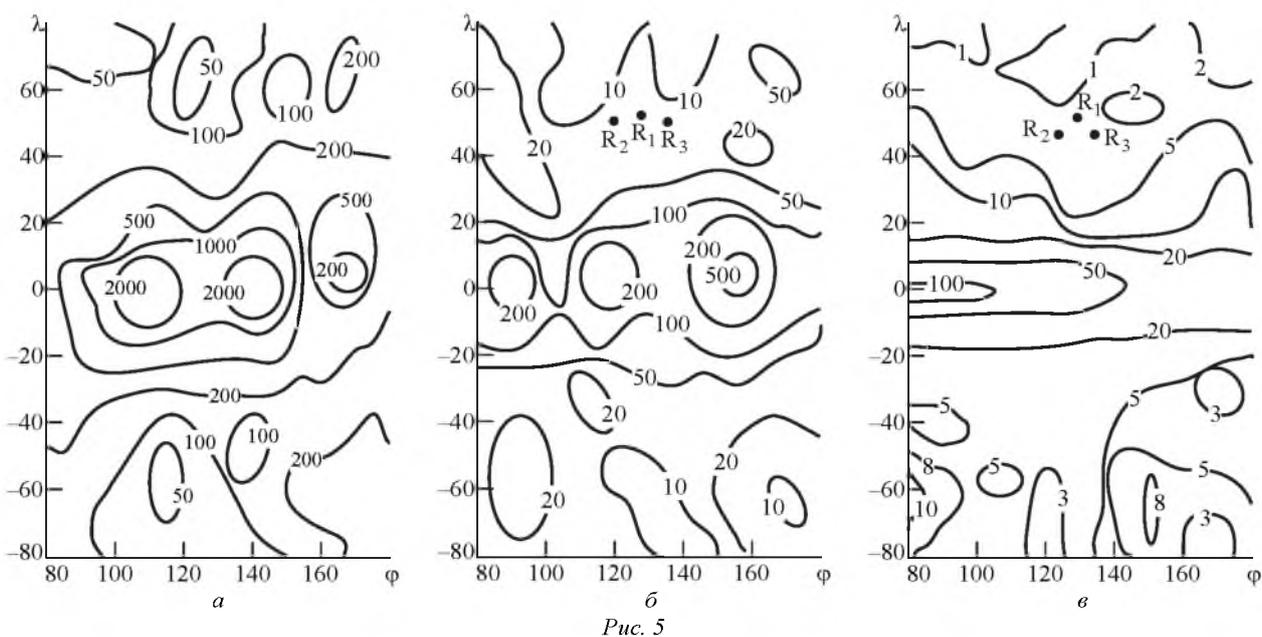


Рис. 5

3. Для обеспечения условия прохождения радиосигналов ОРС радиотрасс с характеристиками, подобными радиотрассе сигнала ЗС, нужно по возможности размещать ОРС как можно ближе к району, в котором необходимо ОМП ЗС.

4. Вследствие диспергирующих свойств ионосферы частоты сигналов ОРС должны быть близкими к частотам сигналов ЗС и/или к частотам сигналов основного и смежных СР.

Следует отметить, что в экваториальных широтах выявлен эффект, называемый геометрическим фактором снижения точности, когда малая ошибка в параметре вызывает большую ошибку в

определении местоположения. Критичным выступает диапазон широт от 20° ю. ш. до 20° с. ш., где ошибка ОМП ЗС имеет неприемлемые значения.

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

- экспериментальная проверка эффективности подсистемы определения координат СР суммарно-дальномерным методом;
- поиск способов уменьшения ошибок ОМП ЗС в экваториальных широтах;
- исследование доплеровских систем геолокации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чельшев В. Д., Якимовец В. В. Радиоэлектронные системы органов административного и военного управления: в 2 ч. Ч. 1: Радиоинтерфейсы систем мобильного радиосервиса: учеб. СПб.: ВАС, 2006. 576 с.
2. Interference localization for Eutelsat satellites – the first European transmitter location system / D. P. Harworth, N. G. Smith, R. Bardelli, T. Clement // Intern. J. of satellite communications. 1997. Vol. 15. P. 155–183.
3. Сухотин В. В. Определение координат источников сигналов в системах спутниковой связи: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Красноярский гос. техн. ун-т. Красноярск, 2003. 24 с.
4. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений / Р. В. Волков, С. В. Дворников, В. Н. Саяпин, А. Н. Симонов. СПб.: ВАС, 2013. 116 с.
5. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: Астрель АСТ, 2002. 992 с.
6. Шебшаевич В. С. Введение в теорию космической навигации. М.: Сов. радио, 1971. 29 с.
7. Волков Р. В., Севидов В. В., Чемаров А. О. Точность геолокации разностно-дальномерным методом с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2014. № 9. С. 12–19.
8. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2012. 260 с.
9. Hoots F. R., Roehrich R. L. Spacetrack Rep. № 3. Models for propagation of NORAD Element Sets // Aerospace defense center, Peterson air force base. 1980. 91 p.

V. V. Sevidov

Military telecommunications academy n. a. Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Saint Petersburg)

A. O. Chemarov

SME "New telecommunication technologies" Ltd. (Saint Petersburg)

Determination of coordinates relay satellites in range-difference system geolocation

Indicated on the origin and development of geolocation as part of radio monitoring satellite links. Denotes the fundamental premise of the system geolocation. Disclosed rangedifference geolocation system, the algorithm of its functioning. Showing coordinate transformations in the interests of geolocation. Outlines the key factors that affect the accuracy of range-difference system of geolocation. Investigated a total-ranging method for determining the coordinates of relay satellites.

Geolocation, relay satellite, ground terminal, coordinate measuring, radio monitoring complex, location, range-difference system, total-ranging method

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2015 г.