



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ- 2017

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ,
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
“ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ 2017”
ПОСВЯЩЕННОЙ ГОДУ ЭКОЛОГИИ В РФ

КРАСНОЯРСК, СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

17-21 АПРЕЛЯ 2017 Г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»**

Проспект Свободный - 2017

Материалы научной конференции
посвященной Году экологии в Российской Федерации
17-21 апреля 2017 г.

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2017 г.

**Радиотехнические системы специального назначения
и прикладные проблемы**

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ

Кохонькова Е.А., Майков О. А.

Научный руководитель д.т.н., заслуж. деятель науки и техники РФ Г. Я. Шайдуров

Сибирский федеральный университет, Военно-инженерный институт

Аннотация

В статье рассматривается альтернативный способ передачи информации при помощи поверхностных волн Рэлея на сильнопересеченной местности карьеров, а также в шахтных выработках, что позволяет передавать сообщения через завалы. Проводится анализ распространения поверхностных волн Рэлея на поверхности грунта, дается расчетная оценка затухания этого типа волн и проводится ее сравнение с экспериментальными данными.

В области добычи полезных ископаемых карьерным и шахтным способами существует потребность в альтернативных методах аварийной связи. Обеспечению радиосвязи препятствуют сильные радиопомехи, резкие перепады рельефа на поверхности Земли и в карьерах, отсутствие прямой видимости при завалах внутри шахтных выработок. Данный метод передачи сигналов направлен на обеспечение связи с персоналом, беспроводного управления техникой при добыче полезных ископаемых, а также аварийной связи в шахтных выработках. Необходимо оценить дальность распространения этого типа волн в грунте и возможность создания такой.

Оценка распространения и затухания волн Рэлея в средах

На рис. 1 приведена схема ретрансляции сейсмического сигнала, распространяющегося по поверхности, система включает в себя приемник, с одним или несколькими геофонами, соединенный с передатчиком, излучающим частотно-манипулированный сейсмический сигнал в среде при помощи вибрационного сейсмоисточника. Для оценки расстояния распространения волн Рэлея по поверхности необходимо провести расчёт ослабления амплитуды смещения частиц среды в безграничном полупространстве в зависимости от расстояния, частоты, коэффициента поглощения среды.

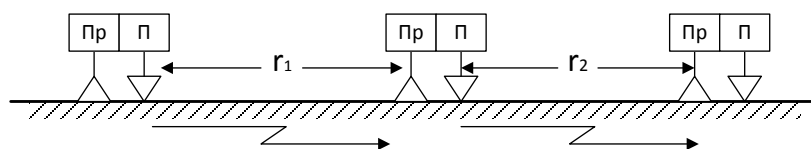


Рис. 1 - Схема передачи сигнала по поверхности среды

Для оценки затухания поверхностных волн зададим основные параметры сейсмического канала:

- исследуемая полоса частот: $\Delta f=80-250$ Гц;
- расстояние от источника до приёмника: $x=100-1000$ м;
- сила удара контактной плиты сейсмоисточника: $P=1500$ Н;
- длительность импульса при работе источника: $\tau_u=15$ мс.

Рассчитаем напряжение на геофоне в зависимости от расстояния, частоты и параметров среды. Волны Рэлея поглощаются средой при удалении от источника пропорционально $(k_R x)^{-1/2}$. На динамику сейсмических волн в реальных средах большое влияние оказывает степень поглощения сейсмической энергии, вызванное потерями упругой энергии за счет необратимых процессов в среде вследствие ее неидеальной упругости, следовательно, амплитуда волны экспоненциально убывает при удалении от источника излучения на расстояние x [1]:

$$A(\omega) = \frac{A_0}{\sqrt{k_R \cdot x}} \cdot e^{-\gamma(\omega) \cdot x}, \quad (1)$$

где A_0 – начальное смещение среды; x – расстояние от излучателя до приёмника; $\gamma(\omega)$ – амплитудный коэффициент поглощения волны Рэлея; k_R – волновое число Рэлея.

Учитывая законы поглощения упругой энергии к уравнению колебания частиц, можно получить выражение, отражающее характер затухания смещения частиц в среде для горизонтальной и вертикальной составляющей волны Рэлея [2, 3, 4]:

$$\begin{aligned} A_x(\omega) &= \frac{A_0}{\sqrt{k_R \cdot x}} \cdot e^{-\gamma(\omega) \cdot x} \cdot \left(e^{-\frac{\omega k_1 z}{V_R}} \cdot \left(\left(\frac{V_R}{V_s} \right)^2 - 2 \right) + 2k_1 k_2 \cdot e^{-\frac{\omega k_1 z}{V_R}} \right), \\ A_y(\omega) &= \frac{A_0}{\sqrt{k_R \cdot x}} \cdot e^{-\gamma(\omega) \cdot x} \cdot \left(e^{-\frac{\omega k_1 z}{V_R}} \cdot \left(\left(\frac{V_R}{V_s} \right)^2 - 2 \right) + 2e^{-\frac{\omega k_1 z}{V_R}} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона,

$$k_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{V_R}{V_p} \right)^2}, \quad k_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{V_R}{V_s} \right)^2};$$

V_p – скорость продольной волны; V_s – скорость поперечной волны; V_R – скорость волны Рэлея; z – глубина измерения; A_0 – начальное смещение среды;

$$V_R = \frac{0,78 \cdot 1,12 \nu}{1 + \nu} \left(\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot V_p. \quad (3)$$

$$A_0 = \frac{F \cdot \tau^2}{4m}, \quad (4)$$

где F – сила удара плиты; τ – длительность импульса; m – масса плиты и присоединённого грунта.

Оценим зависимость напряжения на выходе геофона с чувствительностью $G=27,6 \text{ В/м/с}$, от смещения среды, [1]:

$$U_x(\omega) = A_x(\omega) \cdot \omega \cdot G, \quad U_y(\omega) = A_y(\omega) \cdot \omega \cdot G. \quad (5)$$

Воспользовавшись формулами (2-5), построим график ослабления волны Рэлея на различных частотах, отображается одна компонента волны, так как характер их затухания аналогичный (рис. 2).

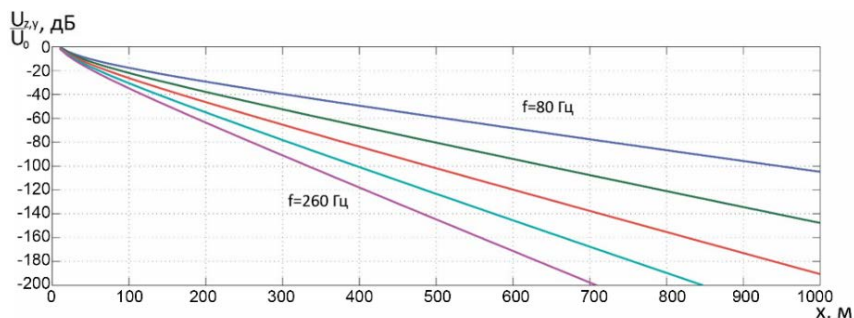


Рис.2 – График затухания сигнала на геофоне зависимости от расстояния в почве

Оценим отношение сигнал/шум (С/Ш) на выходе (рис. 3):

$$q_{U_x} = \frac{U_x(\omega)}{U_N(\omega)}, \quad q_{U_y} = \frac{U_y(\omega)}{U_N(\omega)}, \quad (6)$$

где $U_x(\omega)$, $U_y(\omega)$ – уровень полезного сигнала;

$U_N(\omega)$ – уровень шума.

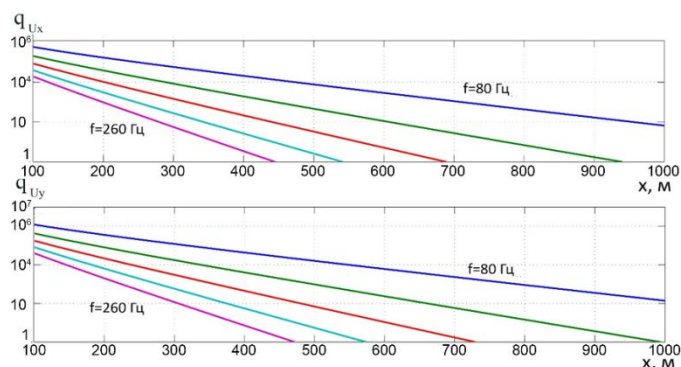


Рис. 3– График отношения с/ш в зависимости от расстояния для частот 80-260 Гц для одного геофона

Анализ экспериментальных данных

Полевые испытания излучателя поверхностных волн были проведены в г. Красноярск в Емельяновском р-не. 29 сентября 2014 г. Периодический сигнал излучается при помощи вибрационного сейсмоисточника с электромагнитным приводом, установленного в

углублении в грунте. Рабочая частота излучателя задается от генератора сигналов в диапазоне от 40-250 Гц. Геофон, подключенный к приемной сейсмостанции, устанавливается в подготовленное углубление, на различных расстояниях от передатчика $r=460-1090$ м. Для приема используется широкополосный усилитель с полосой частот $\Delta f=1-1000$ Гц, коэффициентами усиления $K_u=500, 5000$.

Измерения проводились в сухом грунте, расстояние от источника до приемников указано в таблице 1. По снимку (рис. 5) видно, что среда относительно однородная, но между источником и приемником 3 присутствует лесополоса, что может негативно повлиять на распространение рэлеевских волн.



Рис. 5 – Карта испытаний

Для излучения сигнала выбрана резонансная частота 208 Гц. На рис. 6, 7 показаны спектрограммы принятого сигнала, зарегистрированные при помощи геофонов. Амплитуды сигнала сведены в таблицу 1.

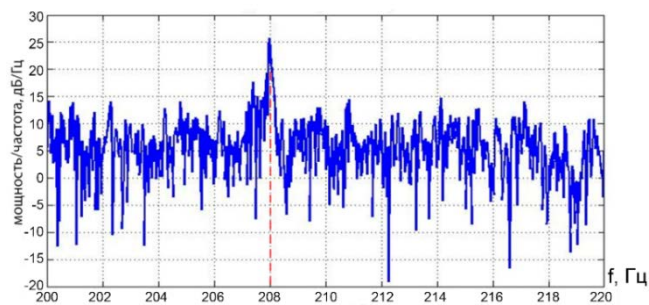


Рис. 6 – Спектр сигнала, измеренный в точке Пр. 1 на $f=208$ Гц. Амплитуда гармоники 25 дБ

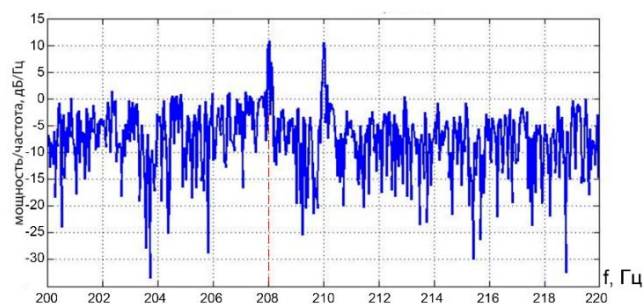


Рис. 7 – Спектр сигнала, измеренный в точке Пр. 3 на $f=208$ Гц. Амплитуда гармоники 10.9 дБ

Таблица 1 – Амплитуды гармоник сигнала на частоте 208 Гц в трех точках приема

Расстояние от источника сигнала, м	Сигнал, дБ	Сигнал/Шум, дБ
460	24,9	10,1
810	17,8	17,1
1090	10,9	10,5

Заклучение

Расчеты указывают на сильная зависимость затухания сигнала от однородности среды, водонасыщенности и ее упругих свойств, шумового фона и частоты излучения сигнала. Сравнивая данные из таблиц и рисунков с экспериментальными измерениями, можно сделать вывод о том, что при указанных условиях, передача сигнала в сухом и плотном грунте на 1 км возможна. Для более упругих и однородных сред прогнозируется большая дальность распространения сигнала. Для увеличения дальности распространения волн Рэлея и отношения сигнал/шум на геофоне, необходимо увеличивать мощность излучения, максимально эффективно согласовывать источник с грунтом и использовать несколько геофонов для приема сигнала.

Список использованных источников

1. В.И. Бондарев. *Сейсморазведка*. Екатеринбург. М.: Уральский государственный горный университет. 2007. 703 с.
2. Г.Я.Шайдулов, Д.С. Кудинов. Радиолокационный метод обнаружения миноподобных объектов с использованием сейсмических ударов. *Журнал. Специальная техника*. 2013 (6). 15-19.
3. И. А.Викторов. *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. Москва. М.: Наука. 1981. 287 с.
4. И. П. Голямина. *Ультразвук*. М.: Маленькая советская энциклопедия. 1979. 400 с.
5. В. П. Дьяконов. MATLAB6.0/6.1/6.5/+SP1+Simulink 4/5. *Обработка сигналов и изображений*. М.: СОЛОН-Пресс. 2005.592 с.

**МОДЕЛЬ УГЛОМЕРНОГО ГНСС-ПРИЕМНИКА КАК ЭЛЕМЕНТ
КОМПЛЕКСНОЙ СРЕДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ**

Колобанова Н. С.

Научный руководитель канд. техн. наук Капулин Д. В.

Сибирский федеральный университет

На современном этапе технического развития совместно с усовершенствованием навигационных систем стремительными темпами идет рост требований к спутниковым аппаратным комплексам приема и обработки навигационных сигналов [1]. Навигационный приемник является основным элементом навигационной аппаратуры потребителей (НАП) и выполняет целый набор функций, среди которых основными являются первичная обработка сигнала, поиск навигационных сигналов и идентификация спутника, прием навигационных сообщений, передаваемых спутником и визуализация полученных результатов [2]. Целью настоящей работы является разработка имитационной модели приемника навигационных спутниковых сигналов (ГНСС-приемника) как элемента комплексной среды проектирования и испытаний электронной аппаратуры. Для моделирования использована система Matlab вместе с модулем моделирования Simulink, который позволяет в графическом режиме строить сложные схемы обработки сигналов.

Основная задача, решаемая компьютерной моделью ГНСС-приемника – моделирование методов угломерных навигационных определений с целью проверки их точности и оценки реализуемости в интегральных схемах класса «Система на кристалле». Моделирование различных методов позволяет найти наиболее удачные решения по алгоритмам обработки сигналов навигационных космических аппаратов и разработать эффективную архитектуру блока цифровой обработки сигналов ГНСС-приемника. Компьютерная модель ГНСС-приемника позволяет проводить моделирование методов угломерных навигационных определений с использованием реализованных в ней методов определения пространственной ориентации, углов Эйлера и разрешения фазовых неоднозначностей принимаемых навигационных сигналов [3]. Для решения задачи определения пространственной ориентации объектов в модели осуществляется пересчет направляющих косинусов из одной системы координат в другую. Образующаяся при этом нелинейная система уравнений для определения координат объекта содержит два линейных уравнения на основе результатов измерений фазовых сдвигов и одно нелинейное уравнение

связи. Для численного моделирования уравнение связи подвергнуто линейаризации. Определение ориентации вектора-базы в модели при неизвестной длине базы возможно при минимальном созвездии из 4-х навигационных космических аппаратов (НКА).

В модели возможно проводить измерение пространственной ориентации вектора-базы, находящегося в горизонтальной плоскости. Для решения такой задачи минимальной является группировка НКА, состоящая из одного спутника. Измерение пространственного углового положения вектора-базы возможно проводить при составе группировки из двух НКА. Для численного решения задачи в модели использован прямой метод интегрирования, поскольку он требует меньшего затрат времени для вычисления и дает все решения системы уравнений.

Для определения углового положения объекта в пространстве в компьютерной модели ГНСС-приемника используется расчет углов Эйлера (курс, тангаж, крен). Угловая ориентация объекта может быть определена через направляющие косинусы двух его осей (продольной и поперечной), поскольку одна из осей объекта однозначно определяется через векторное произведение двух других его осей.

С целью повышения точности определения пространственной ориентации используют интерферометры с расстоянием между антеннами (длиной базы), достигающим нескольких метров. Возникающая при этом неоднозначность фазового сдвига обусловлена тем, что длина волны измеряемых сигналов достаточно мала (около 19 см). При наличии неоднозначности фазовых измерений требуется для каждого НКА определить дополнительный неизвестный параметр, принимающий целочисленные значения. Наиболее эффективные процедуры разрешения фазовой неоднозначности основаны на избыточности фазовых измерений, когда число измерений фазы больше числа неизвестных параметров (координат). В компьютерной модели ГНСС-приемника реализована подобная процедура разрешения фазовой неоднозначности одномоментным методом [3].

Структурная схема разработанной компьютерной модели имеет вид, представленный на рисунке 1.

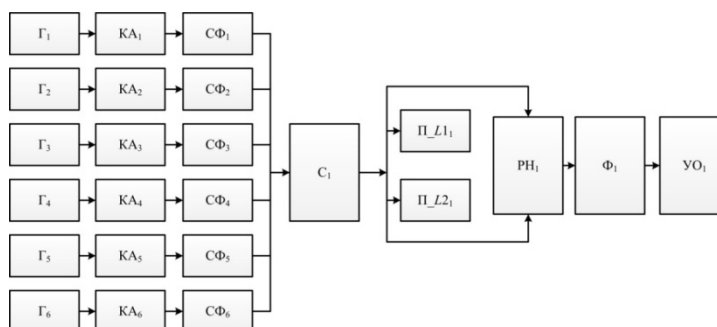


Рис.1– Структурная схема компьютерной модели ГНСС-приемника

Состав компьютерной модели ГНСС-приемника:

- Г1 - Г6 – блоки генерации информационной и частотной составляющей навигационного сигнала космического аппарата 1-6;
- КА1 – КА6 – блоки имитатора генерации и усиления навигационного сигнала на борту космического аппарата 1-6;
- СФ1 - СФ6 – блоки ввода фазового сдвига навигационного сигнала от КА 1 - КА 6;
- С1 – селектор навигационных спутников;
- П_L11 – приемник навигационного сигнала L1;
- П_L21 – приемник навигационного сигнала L2;
- РН1 – блок разрешения фазовой неоднозначности навигационных сигналов с использованием двухчастотного режима;
- Ф1 – блок вычисления фазового сдвига навигационных сигналов;
- УО1 – блок разрешения системы уравнений определения угловой ориентации объекта по величине фазового сдвига навигационного сигнала.

Компьютерная модель ГНСС-приемника, разработанная в среде Matlab Simulink, имеет вид, приведенный на рисунке 2.

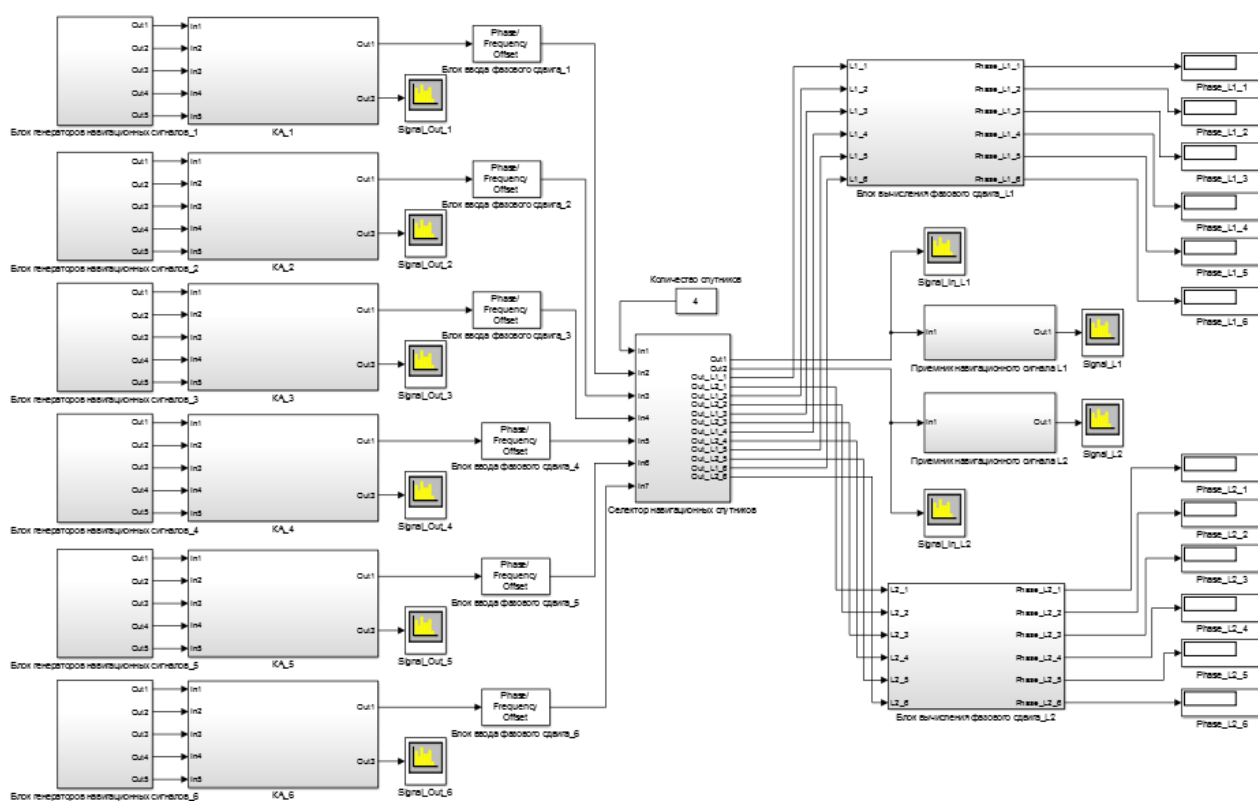


Рис. 2 – Компьютерная модель ГНСС-приемника в среде Matlab Simulink

Представленная компьютерная модель состоит из четырех основных модулей:

- 1) модуль имитации радионавигационных сигналов ГЛОНАСС;
- 2) модуль измерения фазовых сдвигов принимаемых радионавигационных сигналов;
- 3) модуль измерения углов пространственной ориентации;
- 4) модуль разрешения фазовых неоднозначностей.

Возможности компьютерной модели позволяют моделировать методы определения пространственной ориентации, углов Эйлера и разрешения фазовых неоднозначностей принимаемых навигационных сигналов, проводить численные эксперименты, анализировать и оценивать характеристики вариантов реализации алгоритмов обработки сигналов без использования макета ГНСС-приемника или его отдельных блоков.

Кроме выполнения задач основного назначения, направленных на исследование методов угломерных навигационных определений, модель позволяет проводить исследования и анализ:

- 1) процессов функционирования ГНСС-приемника при различном составе наблюдаемой спутниковой группировки (2, 4 или 6 НКА) и различных номинальных значениях частот L1 и L2;

- 2) влияния высоты НКА относительно ГНСС-приемника на ослабление навигационного сигнала (раздельно для L1 и L2);

- 3) тропосферной погрешности при различных значениях температуры, влажности воздуха, атмосферного давления, парциального давления на энергетические и спектральные характеристики принимаемого сигнала (раздельно для каждого НКА);

- 4) различных методов оценки фазы навигационного сигнала как с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, так и с использованием встроенных блоков фазовой автоподстройки частоты;

- 5) энергетических характеристик радиолинии при различном составе видимой спутниковой группировки, различных уровнях потерь в свободном пространстве и потерь, вызванных процессом функционирования передающей и приемной части радиолинии;

- 6) влияния уровня теплового шума приемника на энергетические характеристики радиолинии (раздельно по сигналам L1 и L2);

- 7) различных вариантов распределения компоненты усиления между усилителями в радиоприемном тракте с целью получения оптимальных спектральной и энергетической характеристик принятого навигационного сигнала (раздельно по сигналам L1 и L2);

- 8) полосовых фильтров и их комбинаций в составе ГНСС-приемника. Доступные типы фильтров: Бесселя, эллиптический, Баттеворта, Чебышева первого типа, Чебышева второго типа;

9) различных вариантов структур и параметров коррелятора отдельно для сигналов L1 и L2.

Результаты исследований показали, что предлагаемая модель, предназначенная для исследования разработанных методов угломерных навигационных определений, обладает удовлетворительной точностью, позволяет проводить исследование ключевых характеристик методов угломерных навигационных определений. Диапазон определения углов пространственной ориентации в модели составляет от 0 до 360° с погрешностью не более 10 угловых минут относительно результатов, полученных с использованием макета ГНСС-приемника, измерение фазовых сдвигов возможно проводить с погрешностью не более 5 угловых градусов. Разработанная компьютерная модель имитирует функциональные характеристики блока цифровой обработки сигналов ГНСС-приемника, что позволяет сделать вывод о возможности ее применения при проектировании перспективной навигационной аппаратуры с целью сокращения длительности этапа исследовательских испытаний и макетирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.578.21.0116, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57815X0116).

Список использованных источников

1. Конин В. В., Харченко В. П. *Системы спутниковой радионавигации*. – Национальный авиационный институт. – К.: Холтех, 2010. – 520
2. Перов А. И., Харисов В. Н. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования* – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М: Радиотехника, 2010. – 800
3. Тяпкин В. Н. *Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография*. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 260

РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ НАВИГАЦИИ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОСПУТНИКОВ

Голубятников М. А.

Научный руководитель Гладышев А. Б.

Сибирский федеральный университет

В настоящее время одним из перспективных направлений развития систем ближней навигации является применение сети так называемых «псевдоспутников» (ПС). Системы навигации на основе ПС могут иметь широкий спектр применения, начиная от навигации внутри помещения, например, при выполнении специальных работ, заканчивая навигацией воздушных судов для обеспечения режимов посадки.

Система ближней навигации на основе ПС представляет собой сеть радиомаяков (псевдоспутников), размещенных на местности таким образом, что в зоне навигации уверенно принимаются сигналы от ПС, число которых является достаточным для решения навигационной задачи [1].

Важной частью проектирования систем ближней навигации на основе псевдоспутников является анализ бюджета мощности канала распространения навигационных сигналов между передатчиком и приемником сигнала.

В настоящее время предполагается интеграция приема сигналов ПС с существующими навигационными сигналами СРНС, и по своей функциональной структуре приемная аппаратура потребителей (антенная система, аналоговый и цифровой тракт) должна обеспечивать надежный прием как сигналов СРНС, так и навигационных сигналов ПС. Данная интеграция не ведет к кардинальным изменениям навигационной аппаратуры потребителей (НАП), а дополняется только цифровой обработкой сигналов ПС. Поскольку сигналы ПС излучаются с различного расстояния и использоваться может как всенаправленная антенна, так и антенна со сфокусированной диаграммой направленности, то амплитуда навигационного сигнала в пределах зоны покрытия ПС не должна иметь больших колебаний. Сигналы ПС на близкой дистанции действуют как источники помех, но на большой дистанции имеют недостаточную мощность для их эффективного использования.

Исходя из границ динамического диапазона НАП и геометрической зоны навигации объектов, а также возможностей формирования требуемых диаграмм направленностей

передатчиков ПС (например, в местности со сложным рельефом Земли) требуется сконфигурировать расположение ПС таким образом, чтобы зону навигации охватывали все ПС и их результирующая диаграмма направленности перекрывала зону навигации с требуемым уровнем мощности навигационных сигналов от -165 дБВт до -140 дБВт[2]. Следовательно, при конфигурировании навигационного поля системы навигации на основе ПС распределение энергетики радиолинии в зоне навигации потребителей определяется исходя из размеров зоны навигации потребителей, уменьшения погрешностей измерения радионавигационных параметров сигналов, а также исключения перегрузки приемных трактов потребителей мощными полезными сигналами.

Мощность навигационного сигнала от ПС на входе навигационного приемника определяется выражением:

$$P_c = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}}{L} \quad (1)$$

где $L = (4\pi)^2 R^2 \left(\frac{f}{c}\right)^2$ –затухание сигнала в свободном пространстве, P_c – мощность сигнала на входе приемника (чувствительность), Вт; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны; $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающего устройства; f –несущая частота излучаемого сигнала; c – скорость света.

Тогда максимальное расстояние на котором будет обеспечиваться прием навигационного сигнала заданной мощности будет определяться выражением:

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_c}} \quad (2)$$

Таким образом для расчета размеров зоны навигации в пределах которой будет обеспечиваться прием сигналов с уровнем мощности в диапазоне от -165 дБВт до -140 дБВт необходимо вычислить максимальное расстояние согласно выражения (2) для параметров каждого псевдоспутника при уровнях мощности навигационного сигнала на входе приемника минус 165 дБВт и минус 140 дБВт. При использовании изотропной антенны передающей системы ПС область навигации при заданных уровнях мощностисигналов на входе приемника показана на рисунке 1 а.

Для расчета зоны навигации системы ближней навигации в целом необходимо вычислить область пересечения диаграмм направленности от всех ПС по уровню минус 165 дБВт и минус 140 дБВт (рисунок 1 б).

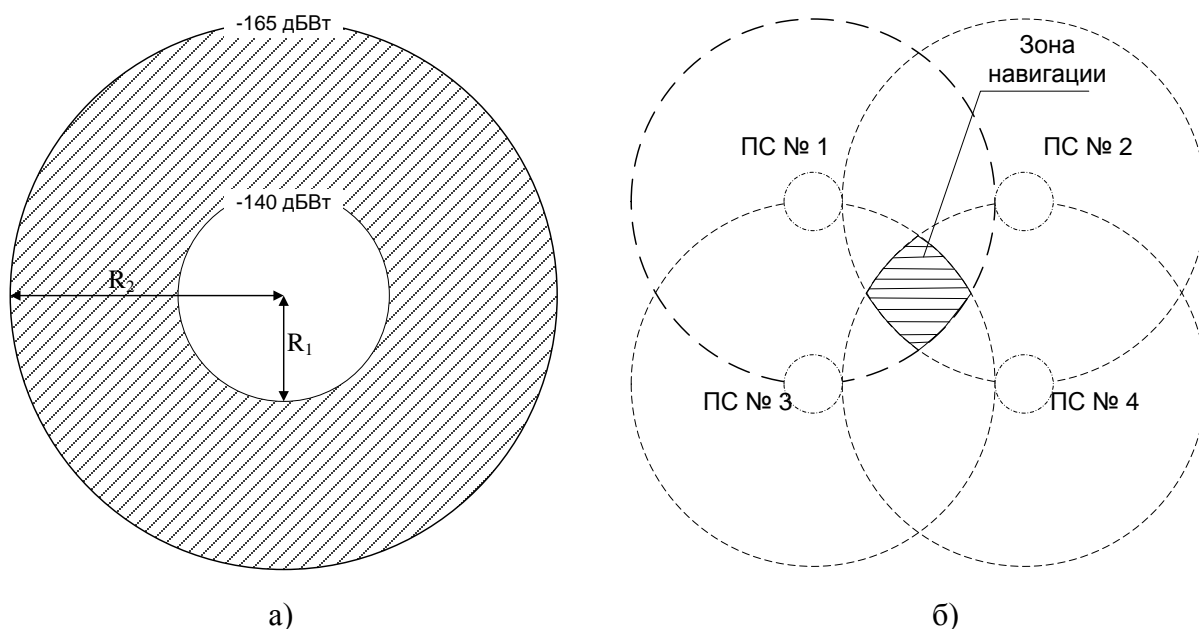


Рис. 1 –Диаграммы направленности псевдоспутника и зона навигации системы

Основываясь на приведенной математической модели была создана программа в среде Matlab, выполняющая расчет пространственных параметров зоны навигации, на основе ПС.

Разработанная программа осуществляет расчет размеров области навигации системы ближней навигации в составе заданного количества ПС.

Программа построена по модульному типу и состоит из модуля расчета диаграмм направленности ПС по уровням минус 140 дБВт и минус 165 дБВт, модуля расчета размеров зоны навигации, модуля вывода графического изображения зоны навигации на экран.

Входными данными являются координаты четырех ПС в геоцентрической системе координат, мощность сигналов ПС, коэффициенты усиления антенн ПС и антенны навигационного приемника, а также рабочие частоты ПС (рис. 2).

В зависимости от введенных данных программа моделирует расположение ПС и строит их диаграммы направленности, вычисляется область пересечения диаграмм направленности ПС по уровню мощности минус 165дБВт (зона навигации). Зона навигации а также область пространства с уровнем сигнала более минус 140 дБВт (зона где навигация невозможна по причине перегрузки навигационного приемника) выделяется цветом на выводимом графическом

изображении (рис. 3). В отдельном окне выводится сечение зоны навигации в горизонтальной плоскости на заданном во входных параметре уровне (рис. 4).

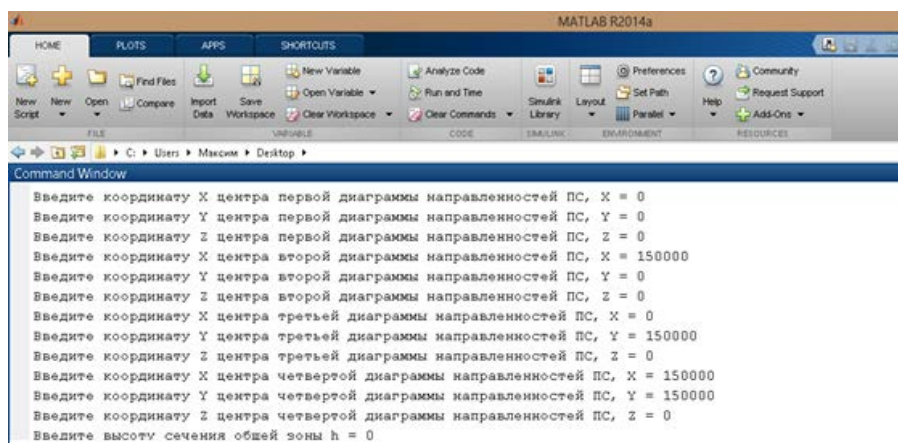


Рис. 2 – Окно ввода входных данных

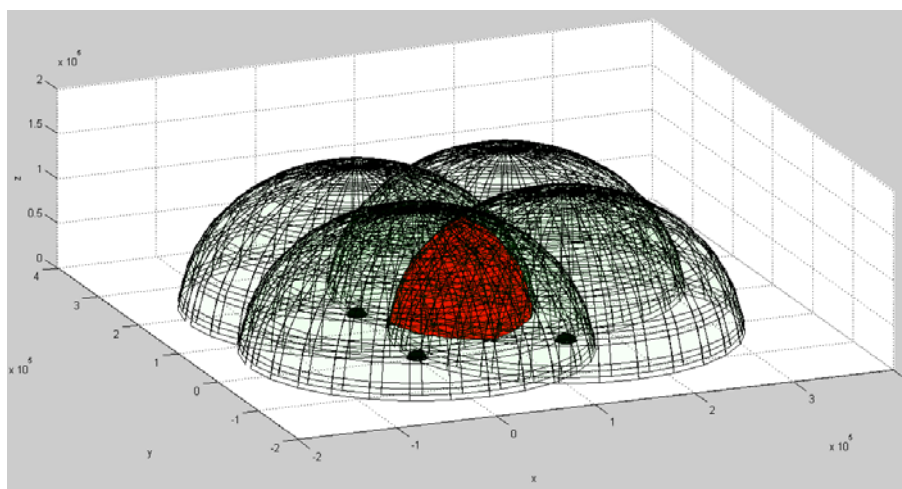


Рис. 3–Вывод результатов расчета зоны навигации

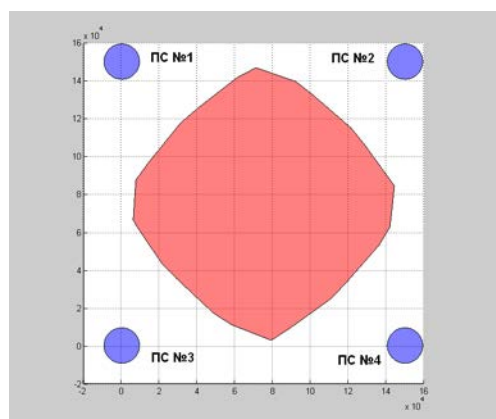


Рис. 4 -Сечение зоны навигации в горизонтальной плоскости

Таким образом, разработанная программа позволяет осуществлять расчет размеров области навигации системы ближней навигации на основе псевдоспутников в зависимости от энергетических параметров навигационных сигналов и расположения псевдоспутников на местности. Предполагается использование ядра программы при разработке компьютерной модели системы ближней навигации на основе псевдоспутников, а также в имитаторе сигналов псевдоспутников[3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10089)

Список использованных источников

1. Gladyshev A. V., Dmitriev D. D., Veysov E. A., Tyapkin V. N., A hardware-software complex for modelling and research of near navigation based on pseudolites, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 803 (1), doi:10.1088/1742-6596/803/1/012048

2. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н., Дмитриев Д.Д., Ратушняк В.Н., Исследование погрешностей измерения координат в наземной системе ближней навигации на основе псевдоспутников, *Успехи современной радиоэлектроники*, 2016, (11), 132–136

3. Гладышев А.Б., Дмитриев Д.Д., Кремез Н.С., Гарин Е.Е., Имитатор сигналов для угломерных ГНСС-приемников на основе современных модульных радиоизмерительных приборов, *Решетневские чтения*, 2016, 1(20), 260-262

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ТОЧНОСТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ НА
ОСНОВЕ ПСЕВДОСПУТНИКОВ**

Шабхаров И.А.

Научный руководитель канд. тех. наук В.Н. Ратушняк

Сибирский федеральный университет

В настоящее время в мире наблюдается тенденция роста транспортных потоков, увеличение плотности и интенсивности движения на различных транспортных узлах, вследствие чего возрастают требования к пропускной способности, точностным характеристикам и надежности навигационных систем управления и контроля транспортных средств. В качестве дополнения к ГНСС, использование наземной радионавигационной системы ближней навигации позволит повысить надежность навигации объектов на ответственных и сложных участках, таких как обеспечение полетов авиации в приаэродромных зонах; судовождение в портовых зонах, устьях, на реках; обеспечения геодезических, картографических и специальных работ. При разработке системы ближней навигации на основе ПС возникает комплексная задача выбора оптимального расположения ПС на местности, при которых будет обеспечиваться заданная точность измерений позиционирования объектов навигации.

На стадии проектирования системы ближней навигации на основе псевдоспутников для определения погрешности расчёта координат подвижного объекта, кроме погрешности измерения навигационных параметров сигналов, необходимо с высокой точностью рассчитывать и формировать требуемое значение в зоне навигации потребителей так называемого «геометрического фактора» (ГФ), характеризующего взаимную геометрию объекта и конфигурации расположения ПС в пространстве.

Практика решения навигационной задачи показывает, что значения ГФ в плане и по высоте могут существенно различаться, в связи с этим необходимо отдельно оценивать допустимые значения ГФ для плановой и высотной составляющей погрешности определения координат.

Для расчета ГФ будем использовать следующее соотношение:

$$\text{ГФ}_{\text{доп}} = \frac{\sigma k_{\text{доп}}}{\sigma R_{\text{итог}}} \quad (1)$$

где $\sigma k_{\text{доп}}$ – погрешность координат; $\sigma R_{\text{итог}}$ – погрешность псевдодальности с учетом особенностей обработки сигнала в навигационной аппаратуре потребителей (НАП).

Из выражения (1) видно, что соотношение между погрешностями определения первичных и вторичных радионавигационных параметров зависит только от геометрии взаимного расположения ПС и потребителя. Суть геометрического фактора заключается в следующем. Для вычисления координат объекта используется система нелинейных уравнений, количество которых определяется количеством ПС. Нелинейность уравнений характеризуется радиусом кривизны волнового фронта, который равен расстоянию от объекта до ПС. Поскольку радиус кривизны волнового фронта намного больше погрешности измерения дальности, то можно линеаризовать систему уравнений в точке приема сигналов, при этом преобразование погрешности будет близко к линейному. При линейном преобразовании погрешность определения координат описывается ковариационной матрицей.

Ковариационную матрицу можно получить из градиентной матрицы:

$$cov(r) = GrTG_r, \quad (2)$$

где G_r – градиентная матрица:

$$G_r = \begin{vmatrix} \frac{dR_1}{dX} & \frac{dR_1}{dY} & \frac{dR_1}{dZ} & \frac{dR_1}{d(C\Delta t)} \\ \frac{dR_2}{dX} & \frac{dR_2}{dY} & \frac{dR_2}{dZ} & \frac{dR_2}{d(C\Delta t)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dR_N}{dX} & \frac{dR_N}{dY} & \frac{dR_N}{dZ} & \frac{dR_N}{d(C\Delta t)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{X_{m1} - X}{R_1} & \frac{Y_{m1} - Y}{R_1} & \frac{Z_{m1} - Z}{R_1} & 1 \\ \frac{X_{m2} - X}{R_2} & \frac{Y_{m2} - Y}{R_2} & \frac{Z_{m2} - Z}{R_2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X_{mN} - X}{R_N} & \frac{Y_{mN} - Y}{R_N} & \frac{Z_{mN} - Z}{R_N} & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{X_{mN} - X}{R_{iN}} = \cos \alpha_i; \quad \frac{Y_{mN} - Y}{R_{iN}} = \cos \beta_i; \quad \frac{Z_{mN} - Z}{R_{iN}} = \cos \gamma_i,$$

где – направляющие косинусы радиус-векторов, соединяющих N -го потребителя и i -го ПС;

R_{iN} – дальность между i -м ПС и N -м потребителем.

Коэффициентами градиентной матрицы являются направляющие косинусы на ПС. На практике используется квадратный корень из следа ковариационной матрицы, который показывает степень увеличения СКО погрешности определения координат по сравнению с СКО погрешности измерения дальности:

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{cov(r_{11}) + cov(r_{22})}$$

$$\sigma_z = \sqrt{cov(r_{33})}. \quad (4)$$

где $\sigma_{x,y}$, σ_z – СКО погрешности определения координат в плане и по высоте соответственно.

Проведем расчёт значений геометрического фактора для различных конфигураций расположения ПС на местности с использованием математического моделирования в программной среде «Mathlab»[3].

В первой конфигурации расположим четыре ПС произвольно в пространстве. Один ПС разместим на высоте 150 м, при этом остальные находятся условно на поверхности Земли на одной высоте ($Y_m = 0$). На рисунках 1а, 1б приведены рассчитанные значения геометрического фактора измерения плановых координат и высоты соответственно.

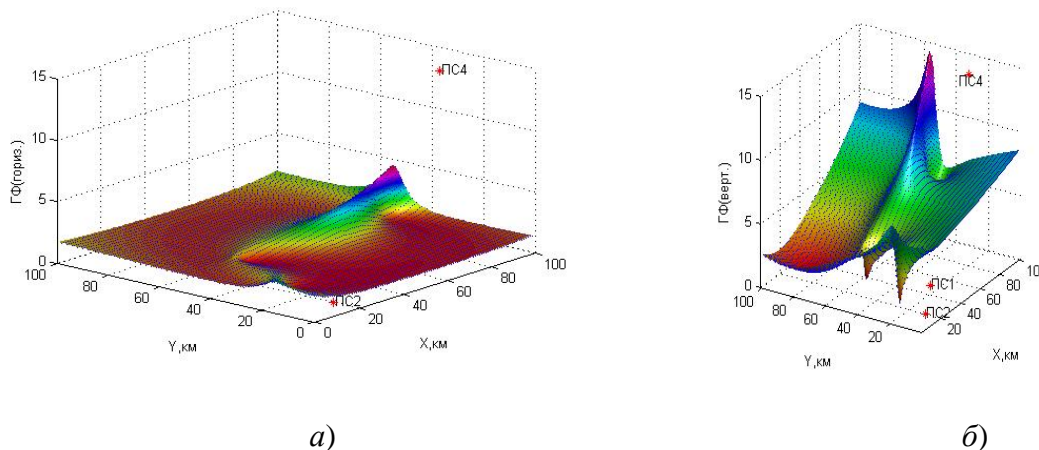


Рис.1 – Конфигурация 1: а – геометрический фактор в плане; б – геометрический фактор по высоте

Геометрический фактор измерения высоты координат значительно больше от удаления от ПС, а так как у нас большая часть устройств находится на Земле, погрешность будет большой. Возможное решение этой проблемы, поднять как можно больше ПС на высотных мачтовых устройствах, тем самым влияние геометрического фактора уменьшится в зоне ближней навигации

Рассмотрим вторую конфигурацию расположения ПС на местности: четыре ПС располагаются по квадрату со сторонами 50 км, а 3 ПС расположим на высоте 100 м (рисунок 2).

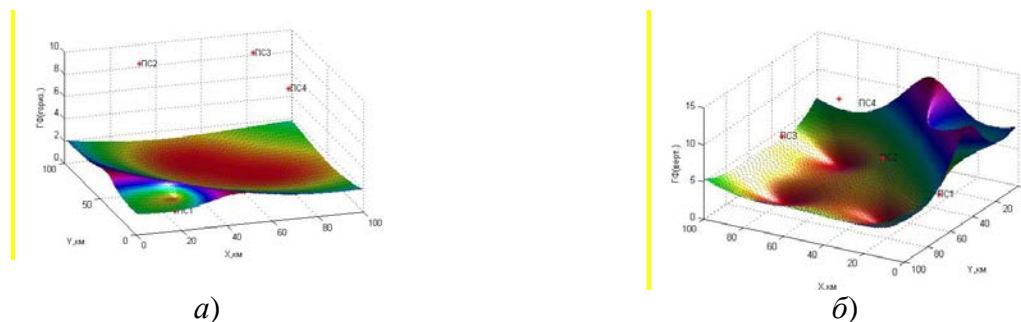


Рис.2 – Конфигурация 2: а – геометрический фактор в плане; б – геометрический фактор по высоте

Геометрический фактор измерения плановых координат при смене конфигурации расположения ПС существенно изменилась. Как видно из рисунков на большей площади геометрический фактор стал влиять гораздо меньше.

Рассмотрим третью конфигурацию расположения ПС – четыре ПС находятся в углах квадрата (расстояние между ними составляет 60км), а четыре ПС подняты на высоту 1 000м (рисунок 3а).

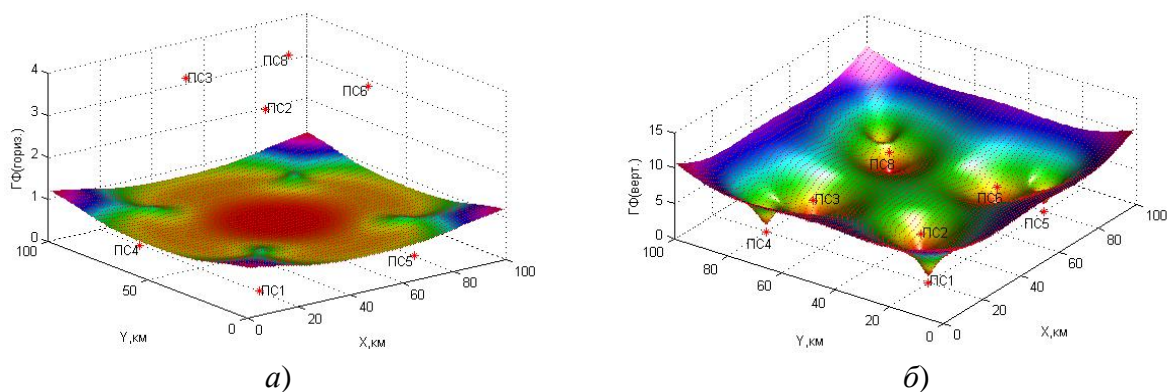


Рис.3 – Конфигурация 3: а – геометрический фактор в плане;
 б – геометрический фактор по высоте

При расположении ПС в конфигурации 3 геометрический фактор измерения плановых координат в ближней зоне практически не изменился, а поднятые на высоту ПС позволяют увеличить область, где значение геометрического фактора по высоте составляет до 10 (рисунок 3б).

Наземная радионавигационная система на основе ПС способна обеспечить достаточные показатели точности измерения плановых координат, что вполне достаточно для наземных и водных видов транспорта. Для воздушных видов транспорта требуется измерение высоты с высокой точностью, определяемой нормами ИКАО. Для обеспечения приемлемой погрешности один или несколько ПС необходимо поднимать на некоторую высоту. Подъем ПС над поверхностью Земли и уровнем остальных ПС возможен при помощи высотных мачтовых устройств, сооружений с использованием близлежащих господствующих высот.

Таким образом, возможность выбора различного расположения ПС на местности позволяет адаптировать навигационное поле под выделенную зону навигации объектов с учетом особенностей рельефа местности, а также сформировать требуемый геометрический фактор в заданной области пространства. При этом желательно использовать 5...10 ПС, размещенных равномерно по периметру зоны обслуживания и несколько ПС, размещенных на разных высотах для улучшения качества навигационного обеспечения по высоте. Для более точного измерения высоты воздушных судов рекомендуется

комплексировать автономные бортовые барометры, радиовысотометры и ГНСС-приемники с приемниками системы ближней навигации на основе ПС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10089).

Список использованных источников

1. А. И. Перов. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – Изд. 4-е, перераб. – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.

2. Успехи современной радиоэлектроники / издательство “Радиотехника”-2016. 11 издание. 132 - 136с