

**А. П. Алешкин¹, И. Г. Архипова², Т. О. Мысливцев¹, С. В. Никифоров¹,
В. Н. Полиенко², А. А. Семенов¹**

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, ² АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ СПУТНИКОВЫХ И НАДВОДНЫХ РЕПЕРОВ В АППАРАТУРЕ МОРСКОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Рассматривается вопрос обеспечения необходимой устойчивости и требуемой точности позиционирования морского потребителя. Для повышения устойчивости процесса навигационных определений предлагается комплексирование высокоточной навигации с помощью космической навигационной системы с надводными радионавигационными средствами (РНС), размещенными на подвижных носителях. Применение последних позволит компенсировать деградацию геометрического фактора в задаче навигационных определений в произвольной точке на водной поверхности. В качестве потребителя может быть рассмотрено буксируемое на кабель-тросе устройство, предназначенное для решения навигационно-связных задач применительно к автономному подводному объекту системы мониторинга и управления технологическими процессами разведки и добычи полезных ископаемых, обслуживанию подводных трубопроводов и инженерных сооружений, находящихся в произвольном районе. В целях обеспечения приемлемой дальности навигации с помощью мобильных надводных РНС предлагается использовать излучение средневолнового диапазона. Специфика и методика реализации навигационных мероприятий выбранного диапазона анализируются детально, что позволило авторам выработать конкретные технические рекомендации и сформулировать точностные оценки позиционирования потребителя для различных условий применения предложенных решений.

Ключевые слова: местоопределение, позиционирование, потребитель, опорные навигационные точки, радионавигационные системы, средние волны.

Для цитирования: Алешкин А. П., Архипова И. Г., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В., Полиенко В. Н., Семенов А. А. Особенности комплексирования навигационной информации от спутниковых и надводных реперов в аппаратуре морского потребителя // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 94–102.

**A. P. Aleshkin¹, I. G. Arkhipova², T. O. Myslivtsev¹, S. V. Nikiforov¹,
V. N. Polienko², A. A. Semenov¹**

¹ Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia, ² JSC Concern CNII Electropribor, Saint-Petersburg, Russia

SPECIFICS OF COMPLEXING OF NAVIGATION INFORMATION FROM SATELLITE AND ABOVE-WATER BENCHMARKS IN THE APPARATUS OF THE MARINE CONSUMER

The issue of ensuring the necessary stability and the required accuracy of positioning of the marine consumer is reviewed. To increase the stability of the navigation sighting process, it is proposed to combine high-precision navigation with the

help of the space navigation system with above-water radio navigation aids (RNAs) placed on mobile carriers. The application of the latter will make it possible to compensate the degradation of the geometric factor in the problem of navigation sighting in an arbitrary point on the water surface. As a consumer, it is possible to consider a device towed by a cable rope and, designed to solve navigation-related problems with respect to a stand-alone submersible facility of the system for monitoring and managing engineering processes of exploration and production of minerals, maintenance of underwater pipelines and engineering facilities located in an arbitrary area. To ensure an acceptable range of navigation with the use of mobile above-water RNAs, it is proposed to use emission in medium-wave band. Specificity and techniques of implementation of navigation activities in the selected range have been analyzed in detail, which enabled the authors to develop specific technical recommendations and formulate accuracy estimates of the consumer positioning for multiple conditions for application of the proposed solutions.

Keywords: position finding, positioning, consumer, reference navigation points, radio navigation systems, medium waves.

For citation: Aleshkin A. P., Arkhipova I. G., Myslivtsev T. O., Nikiforov S. V., Polienko V. N., Semenov A. A. Specifics of complexing of navigation information from satellite and above-water benchmarks in the apparatus of the marine consumer. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 94–102 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-94-102

Качественные изменения, происходящие в последние годы в радионавигационном обеспечении потребителей, связаны с возможностью реализации идей на базе достижений современных гибридных и компьютерных технологий и микропроцессорной техники. Внедрение программных, цифровых способов обработки сложных сигналов, обеспечивающих возможность применения оптимальных методов оценки их параметров, использование в радионавигационной аппаратуре априорных данных позволили объединить в пределах одного устройства приемоиндикаторы (ПИ) нескольких радионавигационных датчиков.

Применение методов псевдослучайной модуляции сигналов повышает помехозащищенность РНС по отношению как к непреднамеренным, так и к организованным помехам.

Сегодня широко используются сетевые глобальные радионавигационные системы космического базирования GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия). Однако бытующее до недавнего времени мнение о возможности вытеснения ими из эксплуатации всех РНС наземного базирования не подтвердилось на практике.

Главной причиной этого стала невысокая помехоустойчивость космических систем в силу малой энергетики их сигналов. В абсолютном большинстве случаев навигационная аппаратура потребителя (НАП) работает одновременно по сигналам двух отмеченных группировок, являясь источником точных координат, либо менее точных при работе по группе РНС наземного базирования или от источника автономной навигации. Наиболее ярким примером такого функционирования является комплексирование GPS и средневолновой РНС Geoloc (Франция).

Однако любой системе, использующейся в отдельности, свойственны какие-то ограничения. Так, для наземных РНС необходима первоначальная точная коррекция места и сличение шкал времени,

а в спутниковых системах навигации ограничениями являются низкая помехозащищенность, изменение во времени геометрического фактора, дискретность в приеме сигналов и необходимость непрерывного обновления эфемеридной информации.

Поэтому РНС средневолнового диапазона рассматриваются отечественными и зарубежными специалистами не только как самостоятельные навигационные средства, позволяющие выполнять операции точного позиционирования, а также как полезное и важное дополнение к космическим РНС (КНС). Следует отметить, в нашей стране накоплен богатый опыт создания РНС средневолнового (СВ) диапазона. Они обеспечивают однозначное, круглосуточное местоопределение морских объектов в любое время суток на расстояниях до 1000 км [1].

Перспективы продуктивного развития СВ РНС определяются следующими предпосылками:

- наличием научно-методического аппарата синтеза автономных процедур выработки и учета поправок распространения радиоволн на основе данных о частотной и фазовой дисперсии сигналов;
- появлением по результатам опытной эксплуатации СВ РНС методик ввода поправок на распространение радиоволн, в той или иной степени компенсирующих систематическую составляющую погрешности местоопределения;
- разработкой эффективных инженерных решений и методик существенного увеличения дальности радиоизлучения РНС на основе реализации процедуры адаптивного согласования и подстройки параметров антенно-фидерного тракта СВ РНС [2].

С этих позиций представляется перспективным исследование варианта навигационных определений надводного морского потребителя,

обеспечивающего позиционирование, например, автономного подводного аппарата системы мониторинга и управления технологическими процессами по разведке и добыче полезных ископаемых, обслуживанию подводных трубопроводов и инженерных сооружений, находящихся в произвольном районе [1], при использовании сети мобильных РНС морского базирования.

Чтобы обеспечить требуемую точность местоопределения, сохранив при этом надежность и устойчивость этого процесса, логично рассмотреть возможность комплексирования НАП КНС с приемоиндикатором мобильных РНС морского базирования. Понятно, что требования уменьшения массогабаритных характеристик антенно-фидерных систем мобильного варианта РНС диктуют необходимость перехода в диапазон повышенных частот, что положительно отразится как на точности местоопределения, так и на размерах антенного комплекса. Однако при этом неизбежно уменьшится мощность излучения и дальность действия применительно к создаваемому радиоканалу. Поэтому реализация мобильного варианта РНС – например, реперной системы корабельного базирования – представляется актуальным способом создания навигационного поля в выбранном позиционном районе.

Специфика предлагаемого диапазона средних волн определяется наличием двух трасс распространения радиоволн, а именно – вдоль поверхности (поверхностная волна) и путем переотражений от ионосферы и далее от подстилающей поверхности (пространственная волна). Наличие неоднородностей как для трассы поверхностной волны, так и вдоль траектории пространственной волны делает прогнозирование параметров распространяющихся электромагнитных колебаний весьма сложной электродинамической задачей.

Рассмотрим задачу местоопределения морского потребителя в описанных условиях, проанализировав особенности применения РНС СВ-диапазона. Радиоволнам СВ-диапазона присуща довольно высокая степень постоянства направления их распространения, вследствие чего они широко используются в угломерных системах. Пространственная волна СВ-диапазона, попадая в ионосферу, отражается и возвращается в приземные слои. Затем она может отразиться земной поверхностью и повторно – ионосферой, вследствие чего пространственная СВ-радиоволна способна проникать далеко за горизонт. Траектория распространения имеет форму ломаной линии, но характеризуется устойчивым постоянством направления [1, 3].

Электрические свойства и высота ионосферы изменяются в значительных пределах в зависимости от времени суток, года и солнечной активности.

Поэтому условия распространения отличаются нестабильностью, что сказывается на работе СВ РНС. Особенно неблагоприятны условия радионавигационных измерений в области, где напряженности полей пространственной и поверхностной волн соизмеримы друг с другом. Анализ литературы [4] указывает на отсутствие единого взгляда на предельную дальность радиосвязи в диапазоне средних волн. Дискуссионный характер касается вопроса взаимодействия пространственной и поверхностной волн. Ряд ученых склоняются к мнению, что характер их взаимодействия случаен и вследствие многолучевости пространственной волны возможно возникновение некоторой полосы интерференции на морской поверхности, за пределами которой поверхностная волна может быть принята так же надежно, как и до этой полосы. Другая группа исследователей считает, что за отмеченной полосой можно принимать только пространственную волну, поскольку в ее пределах уровень поверхностной волны настолько слаб, что вследствие взаимодействия двух типов волн доминирующей оказывается волна пространственная. Также мнения ученых расходятся и в вопросе возможности заметного влияния увеличения мощности излучения на дальность радиосвязи в средневолновом диапазоне.

Следует заметить, что современные технологии позволяют вести оперативный мониторинг состояния ионосферы и, таким образом, появляется возможность прогнозирования условий радиосвязи на средних волнах, поскольку параметры отражающего пространственную волну слоя ионосферы могут быть с достаточной точностью предсказаны.

При наличии мобильности РНС можно заранее планировать маршруты их перемещения в зависимости от характера решаемой целевой задачи и прогнозируемых условий распространения радиоволн. Для прогнозирования условий радиосвязи на СВ могут применяться полуэмпирические модели ионосферы, параметры которых корректируются по данным от различных систем радиозондирования – таким образом модель адаптируется к текущим геофизическим условиям. В отсутствие сети средств мониторинга атмосферы в районах мирового океана особую актуальность приобретает метод определения состояния ионосферы на основе анализа параметров сигналов, излучаемых навигационными космическими аппаратами (НКА) КНС. КНС позволяют определять параметры ионосферы с высокой точностью и оперативностью в любом районе земного шара и в любое время. Первичной ионосферной информацией, которая может быть получена двухчастотной НАП, является полное электронное содержание ПЭС, или ТЕС (Total Electron Content) ионосферы вдоль линий

визирования НАП-НКА (наклонное ТЕС), рассчитываемое по кодовым и фазовым двухчастотным измерениям [5].

Полностью развернутые КНС позволяют осуществлять глобальное радиозондирование ионосферы. В зоне радиовидимости приемников НАП в зависимости от условий расположения может находиться от 5 до 11 НКА. Такое количество видимых НКА позволяет одновременно иметь в среднем 16 лучей (линий визирования на НКА обеих систем) по различным направлениям. Наблюдения за двумя радионавигационными параметрами (время распространения радиоволны и фаза несущего сигнала) на двух частотах позволяют формировать четыре одномоментных измерения двух навигационных параметров для каждого НКА. При полном развертывании СРНС ГЛОНАСС и GPS можно формировать от 40 до 84 одномоментных измерений. Это обеспечивает уникальные возможности определения свойств и параметров, характеризующих состояние атмосферы в любое время суток в регионе радиусом до 1000 км от точки стояния НАП, которую можно разместить на острове или на судне (рис. 1).

Измеренное таким способом ТЕС от созвездия видимых НКА используется для коррекции параметров модели ионосферы в регионе мониторинга радиусом ≈ 1000 км [5].

В эмпирических моделях ионосферы основным параметром, от которого зависят выходные параметры, является ионосферный индекс солнечной активности (ИСА). Поиск оптимального ИСА сводится к подбору значения индекса таким образом, чтобы значения ТЕС, рассчитанные по модели ионосферы, равнялись значениям ТЕС, рассчитанным по сигналам, излучаемым НКА ГЛОНАСС/GPS [6]. Для описания состояния параметров ионосферы рекомендуется использовать отечественную модель IRI-Plas [7]. Для расчета усредненного значения ИСА в качестве целевой функции выбрана сумма квадратов невязок по всем имеющимся наблюдениям ТЕС на расчетный момент времени [5]:

$$f(W) = \sum_{i=1}^N \left[\left(TEC(t_i) - TEC^{IRI-Plas}(t_i, W_i) \right)^2 \right] \rightarrow \min,$$

где $TEC^{IRI-Plas}(t_i, W_i)$ – значение, рассчитанное по i -му НКА с использованием модели IRI-Plas; $TEC(t_i)$ – значение, полученное по i -му НКА; W_i – значение ИСА.

Такой способ оценивания ИСА основан на предположении постоянства индекса в пределах обслуживаемого региона. Данный подход дает усредненные оценки параметров ионосферы, но не позволяет детально описывать ее пространственно-временное состояние. Выход из сложившейся ситуации можно найти в отыскании ИСА

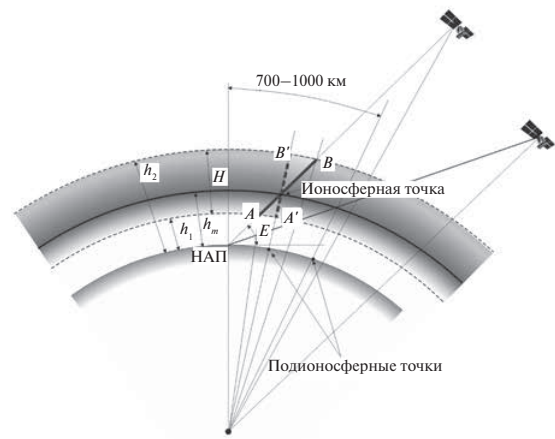


Рисунок 1. Зона адаптации модели ионосферы

в каждой точке интересующего нас района при пересчете измеренного наклонного значения ТЕС с помощью функций наклона в вертикальное значение ТЕС ($VTEC$) для подионосферной точки [2]:

$$f(W) = \sum_{i=1}^N \left[\left(TEC(t_i) - TEC^{IRI-Plas}(t_i, W_i) \right)^2 \right] \rightarrow \min,$$

где $VTEC^{IRI-Plas}(\vec{r}_i, t_i, W_i)$ – значение вертикального ТЕС, рассчитанное по i -му НКА с использованием модели IRI-Plas; $VTEC(\vec{r}_i, t_i)$ – значение вертикального ТЕС, полученное по i -му НКА; \vec{r} – вектор географических координат подионосферной точки.

По совокупности найденных значений ИСА путем интерполяции кубическим сплайном может быть создана «карта» ИСА, которая позволяет учитывать пространственные вариации ионосферы исследуемого региона [5]. В модель ионосферы, используя рассчитанную «карту» ИСА, возможно адаптивно вносить изменения параметров к текущим геофизическим условиям, что позволит эффективно прогнозировать условия распространения пространственной волны.

Использование эмпирической модели ионосферы IRI-Plas, параметры которой адаптированы к текущим геофизическим условиям с использованием мониторинга сигналов НКА ГЛОНАСС/GPS, позволяет оценить пространственно-временное состояние ионосферы в заданном районе (до 1000 км), тем самым обеспечивая возможность прогнозирования условий распространения СВ. Исследования показали, что в СВ-диапазоне наиболее целесообразны фазовые методы измерений. Вследствие влияния подстилающей поверхности, времени суток и года на фазовый сдвиг при распространении радиосигнала возникают значительные систематические погрешности. Однако они носят постоянный характер для данного района, времени суток и года. Это позволяет рассчитать поправки к результатам измерения и тем самым

обеспечивать приемлемую точность местоопределения потребителя.

Разнообразие факторов, воздействующих на фазу радиосигналов, велико. Одновременный учет их влияния малопродуктивен. Поэтому обычно для оценки фазы принимаемого сигнала применяют метод анализа, основанный на последовательном учете влияния возмущающих факторов. Сначала определяется фаза при распространении над однородной в электрическом отношении сферической поверхностью. Затем оценивается влияние электрической неоднородности подстилающей поверхности, т.е. влияние изменения параметров подстилающей поверхности вдоль трассы распространения. Необходимо также учитывать влияние геометрических неоднородностей: гор, холмов, впадин и т.д.

Действующее значение напряженности электрического поля в точке приема в СВ-диапазоне можно оценить по следующей эмпирической формуле:

$$E_D = \frac{10233}{\sqrt{d}} \sqrt{P_{\Sigma} D_{\text{рнс}}} e^{-8,94 \cdot 10^{-4} \lambda^{-0,26} d},$$

где $P_{\Sigma}, D_{\text{рнс}}$ – мощность излучения и КНД передающей антенны РНС соответственно; d – расстояние между точками излучения и приема.

При этом

$$d = \sqrt{\frac{P_{\Sigma} D_{\text{рнс}} D_{\text{прм}} \lambda^2}{16 \pi^2 P_{\text{прм}}}},$$

где $D_{\text{прм}}$ – КНД приемной антенны; $P_{\text{прм}}$ – мощность сигнала в точке приема.

Ранее E_D выражено в мкВ/м, P – в киловаттах, d, λ – в километрах.

Как отмечалось, в СВ-диапазоне в точке приема возможны интерференционные замирания сигнала, глубина и временной интервал которых существенно зависят от характера изменения разности фаз интерферирующих колебаний. Вследствие изменения состояния ионосферы указанная разность фаз для СВ может достигать близких к π значений с более высокой вероятностью, чем в ДВ- и СДВ-диапазонах. Изменение состояния ионосферы и, следовательно, изменение разности хода интерферирующих колебаний происходит по случайному закону. Поэтому интенсивность замираний и их временной интервал также будут случайными функциями времени (на практике – от нескольких секунд до нескольких десятков секунд) [9].

Если расстояние между корреспондентами не слишком велико, амплитуда напряженности поля в точке приема определяется практически только поверхностной волной, для которой условия распространения не зависят от состояния ионосферы. Поэтому напряженность поля в точке приема в этом случае может оставаться неизменной в течение суток. На значительных расстояниях амплитуда

напряженности поля поверхностных волн существенно меньше амплитуды пространственных волн, условия распространения которых определяются в основном состоянием слоев D и E [8]. Это приводит к интерференционным замираниям взаимодействующих сигналов.

Проанализируем влияние условий распространения СВ применительно к радиоволнам, распространяющимся вдоль земной поверхности.

Рассмотрим поле электрической антенны над идеально проводящей плоскостью [9]:

$$E_z = 300 \left(\sqrt{P} / d \right) \exp[i(\omega t - kd + \pi/2)] V(x, y, z),$$

где $V(x, y, z)$ – медленно меняющаяся комплексная функция координат, обычно называемая функцией или множителем ослабления.

Для фазовых РНС (ФРНС) важнейшее значение имеет аргумент множителя ослабления, взятый с обратным знаком. Он называется дополнительной фазой $\varphi_{\text{доп}} = -\arg V(x, y, z)$.

Поэтому фаза поля φ в точке наблюдения будет равна $\varphi = \omega t + \pi/2 - (kd - \varphi_{\text{доп}})$.

Волновое сопротивление Z' среды равно отношению напряженностей электрического и магнитного полей $E_x / H_y = Z'$. Во многих работах [8, 9] по распространению радиоволн используется понятие приведенного поверхностного импеданса $\Delta = Z' / Z_0$, где $Z_0 = \sqrt{(\mu_0 / \epsilon_0)} = 120\pi$ Ом.

В ряде работ принята классификация трасс распространения в зависимости от аргумента поверхностного импеданса Δ для подстилающих поверхностей:

- сильно индуктивная трасса $-\pi/4 < \arg \Delta < \pi/2$;
- слабо индуктивная трасса $0 < \arg \Delta \leq \pi/2$;
- емкостная трасса $-\pi/4 < \arg \Delta \leq 0$.

Рассмотрим понятие дополнительной фазы поля излучения электрического диполя над однородной земной поверхностью.

Решение задачи определения поля вертикального диполя, расположенного на земной поверхности, электрические свойства которой описываются приведенным поверхностным импедансом Δ , а сама поверхность аппроксимируется сферой радиуса a , приводит к следующему выражению для функции ослабления [9]:

$$V(x, y) = (\tau x_i^{-1})^{1/2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-ixt_n)}{t_n - q^2} f_n(y),$$

$$\varphi_{\text{доп}} = -\arg V(x, y, z).$$

При этом для хорошо проводящих трасс (над поверхностью моря) дополнительная фаза вычисляется по формуле

$$\varphi_{\text{доп}} = -\arg V\left[0,313x^{3/2} / (1-0,313x^{3/2})\right].$$

В [9] отмечается, что фазовая ошибка не будет превосходить 0,05 рад при выполнении условия $d \leq 1,52 \cdot 10^{-5} \lambda \sigma^2$; $x \leq 0,7$. Здесь $x = (ka)^{(1/3)}(d/a)$, a – радиус кривизны сферы, равный в нашем случае радиусу Земли.

При использовании дальномерного способа позиционирования дополнительная фаза непосредственно влияет на точность оценивания навигационного параметра. При реализации разностно-дальномерного способа результат измерения разности фаз будет зависеть от разности высотных составляющих дополнительной фазы. В точке приема, расположенной ниже плоскости горизонта, дополнительная фаза практически не зависит от расстояния и поэтому погрешность измерения радионавигационного параметра, обуславливаемая высотой, отсутствует. Если же по отношению хотя бы к одной из станций точка приема окажется выше плоскости горизонта, то при использовании разностно-дальномерного способа будут иметь место значительные погрешности определения координат.

На качество навигационных определений морского потребителя также оказывает влияние ветровое волнение поверхности. Известно, что высота волн достигает предельной величины через 10–20 часов после появления ветра. Показано, что заметное влияние ветрового волнения моря на распространение радиоволн может проявляться только в коротковолновой части СВ-диапазона во время очень сильных штормов при условии возникновения развитого волнения. Опыт эксплуатации ФРНС в СВ-диапазоне подтверждает отсутствие заметного влияния ветрового волнения моря на дополнительную фазу. Изменение дополнительной фазы в зависимости от силы ветра (до 10 м/с) над морской трассой обнаружено не было [9].

Для расчета поправок, призванных компенсировать паразитный набег фазы, эффективным является подход, использующий для описания поля ошибок интерполирующего полинома функции двух переменных (координат), коэффициенты которого вычислены с использованием метода наименьших квадратов. Этот полином имеет следующий вид [9]:

$$\varphi_{\text{доп}}(\varphi, \lambda) = \varphi_{\text{доп}}(\varphi_0, \lambda_0) + \sum_{i=0, k=0}^N a_{i,k} (\varphi - \varphi_0)^i (\lambda - \lambda_0)^k,$$

где $a_{i,k}$ – упомянутые выше коэффициенты; $[\varphi, \lambda_0]$ – координаты (широта, долгота) некоторой точки в центре рабочей зоны, для которой известно значение $\varphi_{\text{доп}}(\varphi_0, \lambda_0)$; N – степень аппроксимирующего полинома.

Также существует метод вычисления поправок с использованием карты проводимости

(используется массив значений проводимостей почвы или поверхностного импеданса). При этом трасса распространения разбивается на равномерное число участков. Вычисляются координаты центров участков, которые используются для нахождения элемента массива, содержащего искомое значение проводимости.

При распространении над реальной земной поверхностью сигнал испытывает значительные изменения: наряду с возникновением дополнительной фазы изменяется амплитуда сигнала, возникают дисперсионные явления. Между этими эффектами существует определенная функциональная связь. Явление дисперсии проявляется в наличии частотной зависимости дополнительной фазы и времени группового запаздывания.

Составляющая времени группового запаздывания огибающей сигнала, вызванная частотной зависимостью дополнительной фазы, равна

$$\tau_3 = \left. \frac{d\varphi_{\text{доп}}}{df} \right|_{f=f_0},$$

где f_0 – несущая частота сигнала.

Для сигнала, состоящего из двух спектральных компонент с частотами f_1 и f_2 , время группового запаздывания приблизительно можно определить по формуле $\tau_3 = [\varphi_{\text{доп}}(f_1) - \varphi_{\text{доп}}(f_2)] / (f_2 - f_1)$.

Эту величину измерить нельзя, однако можно измерить несогласованность времени прихода по шкалам точного и грубого измерений.

Обозначим $\psi = f_0 \sigma_\tau = f_0 \tau_3 - \varphi_{\text{доп}}$. Аналогично получим $\psi = f_1 \tau_3 - \varphi_{\text{доп}}(f_1)$.

Очевидно, что при распространении над однородной по физическим свойствам подстилающей поверхностью $\varphi_{\text{доп}}$ и ψ являются функциями одних и тех же параметров d и Δ . Иначе имеем $\varphi_{\text{доп}} = f_1(d, \Delta)$; $\psi = f_2(d, \Delta)$.

Исключая Δ из этой системы уравнений, получаем $\varphi_{\text{доп}} = f(d, \Delta)$.

Зависимость $\varphi_{\text{доп}}$ и ψ в явном виде определить нельзя. Для расстояний, соответствующих $x \leq 1,0 - 1,2$, применимо следующее полиномиальное представление:

$$\varphi_{\text{доп}}(d) = \alpha_1 \psi + \alpha_2 \psi^2 + (b_1 \psi + b_2 \psi^2) d + (c_1 \psi + c_2 \psi^2) d^2.$$

Для больших расстояний справедливо иное соотношение [9]:

$$\varphi_{\text{доп}}(d) = \alpha_1 \psi + \alpha_2 \psi^2 + \alpha_3 \psi^3 + (b_1 \psi + b_2 \psi^2) d^{-1} + (\lambda_1 \psi + \lambda_2 \psi^2) d^{-2}.$$

Рассмотрим точностные характеристики позиционирования надводного морского потребителя. Задача сводится к определению потребителем собственного местоположения путем проведения навигационных измерений относительно РНС – опорных навигационных точек (ОНТ), пространственные

координаты которых известны с определенной точностью (в нашем случае это координаты мобильных СВ РНС). В качестве измеряемых навигационных параметров могут использоваться дальности (разности дальностей) между потребителем и ОНТ, угловые координаты, а в качестве измеряемых параметров сигналов – временная задержка распространения радиосигнала, фаза принимаемого от РНС колебания (разность фаз колебаний, излученных от пространственно разнесенных ОНТ).

Будем ориентироваться на ситуацию, когда сеть ОНТ (РНС) морского базирования состоит из 2–4 пунктов, топология которых также подлежит исследованию в целях определения оптимальной в некотором смысле конфигурации. Для эфемеридного обеспечения собственно ОНТ могут быть привлечены традиционные РНС ДВ-, СВ-диапазона, реперы донного базирования, навигационное поле КНС, а также приемоиндикаторы, реализующие

комплексирование навигационной информации, поступающей от различных систем. Дополнительные возможности в целях повышения точности навигации ОНТ может обеспечить режим дифференциальных определений, а также использование принципов мониторинга целостности навигационных полей, когда реализуется идеология проверки получаемых результатов позиционирования путем выполнения взаимных измерений.

Рассмотрим режим навигационных измерений при использовании поверхностной волны. В качестве точностной характеристики примем геометрический фактор – отношение среднеквадратичного отклонения (СКО) погрешности местоопределения к СКО измерений. При определении геометрического фактора использован дальномерный метод (измерения дальности до ОНТ) определения координат на водной поверхности. При расчете дальностей учтена кривизна поверхности Земли. Моделирование проведено для разных широт и долгот, чтобы наглядно оценить топологию геометрического фактора.

Анализ результатов моделирования подтверждает возможность решения задачи местоопределения надводного потребителя с погрешностью, фактически определяемой точностными характеристиками эфемеридного обеспечения реперных РНС.

В задачах местоопределения потребителя по нескольким ОНТ считается близким к оптимальному значение геометрического фактора в диапазоне 1,5–2,5. Анализ приведенных ниже результатов моделирования позволяет сделать вывод о возможности достижения указанных значений как при использовании мобильных РНС, НКА СРНС, так и при их комплексировании.

При этом продемонстрированы достижимые значения геометрического фактора при решении навигационной задачи при различном количестве используемых ОНТ и их различной групповой топологии. Приведенные сведения могут быть востребованы при реализации методики прогнозирования состояния ионосферы для обхода зон интерференции.

Результаты компьютерного моделирования по определению местоположения надводного потребителя представлены на рис. 2, 3. Здесь эквипотенциальные линии – значения геометрического фактора. Координаты города Санкт-Петербурга – 60N, 30E.

Заключение

В ходе проведенных исследований оценена возможность местоопределения надводного потребителя по навигационным сигналам РНС СВ-диапазона путем решения следующих частных задач:

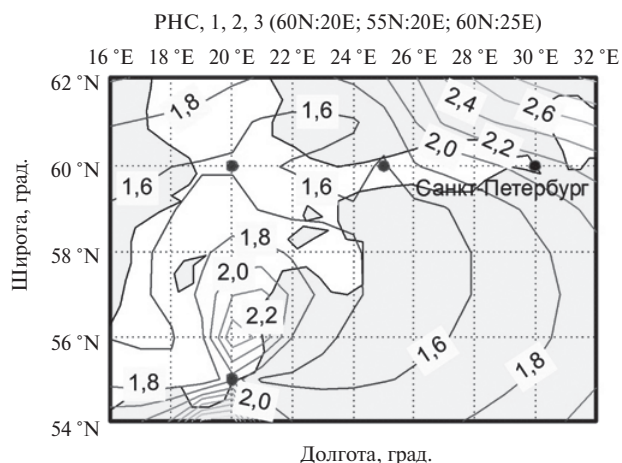


Рисунок 2. Позиции РНС № 1 и № 3 расположены на одинаковой долготе, а РНС № 2 и № 3 расположены на одинаковой широте. Точки на графике – позиции РНС

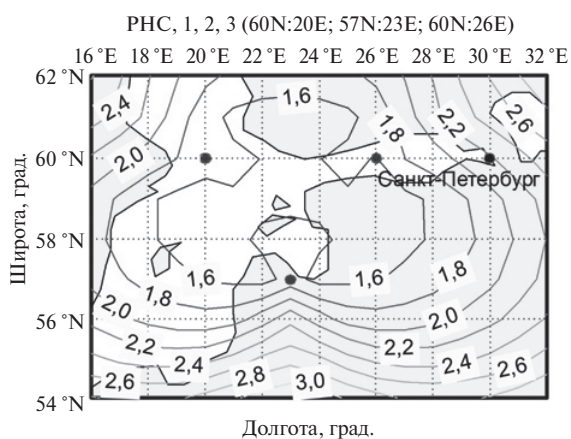


Рисунок 3. Позиции РНС № 1 и № 2 расположены на одинаковой широте

- Выбран математический аппарат и оптимизирован алгоритм определения местоположения по сигналам СВ РНС морского базирования, ориентированный на процедуры классического решения обратной задачи.
- Предложен научно-методический аппарат прогнозирования состояния ионосферы для парирования влияния пространственной волны, а также оценки дальности радиосвязи и значения подлежащего компенсации фазового набега.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность решения задачи местоопределения с погрешностью в несколько десятков метров, вскрыли направления, продолжение деятельности

по которым представляется перспективным, обозначили пути программно-алгоритмической и макетной реализации полученных решений.

Основную сложность представляет разрешение противоречия между громоздкостью теоретического описания и достоверного математического моделирования процессов взаимодействия пространственной и поверхностной волны в диапазоне средних волн с учетом воздействия как традиционных, так и специфических геофизических факторов, с одной стороны, и особенностями практической реализации элементов антенно-фидерного тракта и процедур пространственно-временной обработки сигнала в заявленном диапазоне радиоволн – с другой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янжура А. С., Осадчий А. И., Бушманов С. М. Сопряжение подводных автоматизированных систем со спутниковым каналом связи // Информатика и космос. 2017. № 4. С. 59–63.
2. Архипова И. Г., Полиенко В. Н. Метод дистанционного измерения входного импеданса и согласования передающей антенны КВ диапазона с фидером // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 9. С. 71–73.
3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн: учебное пособие. М.: Связь, 1972. 336 с.
4. Никитенко Ю. И., Быков В. И., Устинов Ю. М. Судовые радионавигационные системы. М.: Транспорт, 1992. 336 с.
5. Мониторинг параметров ионосферы по данным навигационных измерений в СРНС ГЛОНАСС/GPS / В. Ф. Иванов, Т. О. Мысливцев, Е. А. Ткачев, Б. В. Троицкий // Труды XXIV Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург, 2006. Вып. 6. С. 476–484.
6. Ortikov M. Yu., Shemelov V. A., Shishigin I. V., Troitsky B. V. Ionospheric index of solar activity based on the data measurements of the spacecraft signals characteristics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, no. 65, pp. 1425–1430.
7. Модель ионосферы IRI-Plas [Электронный ресурс]. URL: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/> (дата обращения: 01.09.2017)
8. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
9. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Фазовый метод определения координат. М.: Советское радио, 1979. 280 с.

REFERENCES

1. Yanzhura A. S., Osadchiy A. I., Bushmanov S. M. Pair of underwater automated systems with satellite communication channel. *Informatsiya i kosmos*, 2017, no. 4, pp. 59–63 (In Russian).
2. Arkhipova I. G., Polienko V. N. [Method for remote measurement of antenna input impedance and matching of the transmitting antenna HF range feeder]. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 9, pp. 71–73 (In Russian).
3. Dolukhanov M. P. *Rasprostranenie radiovoln* [Radio wave propagation]. Uchebnoe posobie. Moscow, Svyaz Publ., 1972, 336 p. (In Russian).
4. Nikitenko Yu. I., Bykov V. I., Ustinov Yu. M. *Sudovye radionavigatsionnye sistemy* [The ship's navigation system]. Moscow, Transport Publ., 1992 336 p. (In Russian).
5. Ivanov V. F., Myslivtsev T. O., Tkachev E. A., Troitskiy B. V. Monitoring of the parameters of the ionosphere according to the navigation measurements in the SRNS GLONASS/GPS. *Trudy XXIV Vserossiyskogo simpoziuma «Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnyh sred»*. Saint-Petersburg, 2006, iss. 6, pp. 476–484 (In Russian).
6. Ortikov M. Yu., Shemelov V. A., Shishigin I. V., Troitskiy B. V. Ionospheric index of solar activity based on the data measurements of the spacecraft signals characteristics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, no. 65, pp. 1425–1430.
7. [The model of the ionosphere IRI-Plas] (In Russian). Available at: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/> (accessed 01.09.2017)
8. Alpert Ya. L. *Rasprostranenie elektromagnitnykh voln i ionosfera* [The propagation of electromagnetic waves and the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 564 p. (In Russian).
9. Kinkulkin I. E., Rubtsov V. D., Fabrik M. A. *Fazovyi metod opredeleniya koordinat* [Phase method of determining the coordinates]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979, 280 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алешкин Андрей Петрович, д.т.н., профессор, профессор кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: a_aleshkin@mail.ru.

Архипова Ирина Григорьевна, к.т.н., старший научный сотрудник, зам. главного конструктора по направлению, АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»», Санкт-Петербург, 197046, ул. Малая Посадская, д. 30, e-mail: irinega25@gmail.com.

Мысливцев Тимофей Олегович, д.т.н., доцент, начальник кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: tim33@mail.ru.

Никифоров Сергей Валерьевич, к.т.н., преподаватель кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: uncleserega@yandex.ru.

Полиенко Владимир Николаевич, к.т.н., старший научный сотрудник, главный конструктор по направлению, АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»», Санкт-Петербург, 197046, ул. Малая Посадская, д. 30, e-mail: vpolienko@eprib.ru.

Семенов Александр Александрович, адъюнкт кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: semenov.aleksand@mail.ru.

AUTHORS

Aleshkin Andrey, Dr., professor, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Uniform Time System Means, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: a_aleshkin@mail.ru.

Arkhipova Irina, PhD, senior staff scientist, deputy chief designer on direction, JSC Concern CNII Electropribor, 30, Malaya Posadskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197046, Russian Federation, e-mail: irinega25@gmail.com.

Myslivtsev Timophey, PhD, associate professor, chief, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Uniform Time System Means, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: tim33@mail.ru.

Nikiforov Sergey, PhD, lecturer, Department of the Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Uniform Time System Means, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: uncleserega@yandex.ru.

Polienko Vladimir, PhD, senior staff scientist, chief designer on direction, JSC Concern CNII Electropribor, Saint-Petersburg, 197046, Malaya Posadskaya ulitsa, 30, e-mail: vpolienko@eprib.ru.

Semenov Aleksandr, adjunct, Department of Transmitting, Antenna-Feeder Devices and Uniform Time System Means, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: semenov.aleksand@mail.ru.