

А. П. АЛЁШКИН, И. Г. АРХИПОВА, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, С. В. НИКИФОРОВ,
В. Н. ПОЛИЕНКО, А. А. СЕМЁНОВ

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ НАДВОДНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕПЕРОВ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Рассматривается вопрос обеспечения необходимой точности позиционирования морского потребителя. Для повышения надежности процесса навигационных определений предлагается вариант реализации системы, включающий средства как стационарного берегового, так и мобильного надводного базирования. В целях обеспечения приемлемой дальности и точности навигации с помощью надводных радионавигационных средств (РНС) предлагается использовать излучение средневолнового диапазона. Специфика реализации навигационных мероприятий выбранного диапазона анализируется детальным образом, что позволило авторам выработать конкретные технические рекомендации и сформулировать точностные оценки позиционирования морского потребителя для различных условий применения предложенных решений.

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

Введение

Качественные изменения, происходящие в последние годы в радионавигационном обеспечении потребителей, связаны с возможностью реализации технических идей на базе достижений современных гибридных и компьютерных технологий, а также микропроцессорной техники [1, 13]. Внедрение программных, цифровых способов обработки сложных сигналов, обеспечивающих возможность применения оптимальных методов оценки их параметров, использование в радионавигационной аппаратуре априорных данных делает возможным объединение в пределах одного приемника (ПИ) нескольких навигацион-

Алешкин Андрей Петрович. Доктор технических наук, профессор кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского (С.-Петербург).

Архипова Ирина Григорьевна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель главного конструктора по направлению, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Мысливцев Тимофей Олегович. Доктор технических наук, доцент, начальник кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

Никифоров Сергей Валерьевич. Кандидат технических наук, преподаватель кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

Полиенко Владимир Николаевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный конструктор по направлению, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Семёнов Александр Александрович. Аджункт кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академии им. А.Ф. Можайского.

ных полей. В настоящее время обсуждается содержание концепции координатно-временного навигационного обеспечения (КВНО) [2, 14, 15], в рамках которой уточняются требования различных классов перспективных потребителей к КВНО в обобщенном виде:

- обеспечение непрерывности и бесшовности навигационно-временных определений, независимо от погодных и физико-географических условий;
- решение задач навигации и синхронизации на прецизионном уровне в пределах области пространства, на которую распространяется деятельность потребителя (группы потребителей);
- возможность (вплоть до глобальной) масштабирования зон обслуживания потребителей с привязкой объектов к единой геодезической системе координат и шкале всемирного времени;
- определение пространственного положения объектов с требуемой точностью в режиме реального времени и в любой из природных сред.

Многим из приведенных выше требований соответствуют глобальные навигационные сетевые системы (ГНСС) космического базирования ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США). Вместе с тем существовавшее до недавнего времени мнение о том, что есть вероятность вытеснения ими из эксплуатации всех РНС поверхностного базирования, не подтвердилось на практике [1].

Главной причиной этого стала невысокая помехоустойчивость космических систем в силу малой энергетики их сигналов. В связи с этим в большинстве случаев навигационная аппаратура потребителя (НАП) работает одновременно по сигналам двух независимых РНС. Примером такого функционирования является комплексирование GPS и средневолновой РНС Geoloc (Франция) [3]. Кроме того, следует отметить жесткие требования ИМО (Международной морской организации) и страховых компаний, обслуживающих морских перевозчиков, о наличии на борту судна двух независимых, близких по точности позиционирования навигационных систем. Действительно, любой системе, использующейся в отдельности, свойственны ограничения. Так, для наземных РНС необходимы первоначальная точная коррекция места и сличение шкал времени, а в спутниковых системах навигации ограничениями являются низкая помехозащищенность, возможное изменение во времени геометрического фактора, многолучевость при приеме сигналов и необходимость периодического уточнения эфемеридной информации.

Существуют также следующие задачи:

- повышение устойчивости навигационного обеспечения автономного подводного объекта системы мониторинга;
- управление технологическими процессами при разведке и добыче полезных ископаемых;
- обслуживание подводных трубопроводов и инженерных сооружений с использованием буксируемого устройства, оснащенного аппаратурой потребителя космической навигационной системы [12].

Основная часть

В условиях, когда требуется построение наземных функциональных дополнений, формирующих навигационное поле, которое позволяет потребителю определять координаты с точностью, близкой к точности местоопределения по ГНСС, целесообразно рассмотреть следующее направление исследований. При

использовании существующих вариантов поверхностных (наземного или морского базирования) РНС перспективным представляется увеличение широты охвата их действия и точности измерений путем наращивания мощности принимаемого потребителем сигнала (КПД передающего антенно-фидерного тракта РНС), а также парирование процесса деградации геометрического фактора, обусловленного статичностью береговых маяков и произвольной динамикой потребителя.

По этой причине поверхностные РНС, в частности РНС средневолнового диапазона (СВ), рассматриваются отечественными и зарубежными специалистами не только как полезное и важное дополнение к космическим РНС, но и как самостоятельные навигационные средства, позволяющие выполнять операции точного позиционирования. Следует отметить, в нашей стране накоплен богатый опыт создания СВ РНС [4, 8]. Они обеспечивают однозначное, круглосуточное местоопределение морских объектов на расстояниях до 500 км.

Для обеспечения возможности парирования высоких значений геометрического фактора представляется перспективным рассмотреть концепцию построения передвижных СВ РНС надводного базирования (например, корабельного типа или плавучей платформы). Следует проанализировать вариант их совместного применения с береговыми РНС, самостоятельная эксплуатация которых в данном регионе не позволяет с достаточной точностью определять координаты потребителя. Перспективы продуктивного развития подобных СВ РНС зависят от следующих предпосылок:

- наличия научно-методического аппарата синтеза автономных процедур выработки и учета поправок распространения радиоволн на основе прогнозирования данных о частотной и амплитудно-фазовой дисперсии сигналов [5, 6, 7];
- появления эффективных инженерных решений и методик существенного увеличения дальности радиоизлучения РНС на основе реализации процедуры адаптивного согласования и подстройки параметров антенно-фидерного тракта [10].

Известно, что для повышения точности навигационных измерений следует использовать более коротковолновое излучение. При этом ощутимы потери в дальности действия соответствующих систем. Вместе с тем также очевидно, что создание антенн для более короткого диапазона волн при рассмотрении варианта их мобильной реализации более предпочтительно, чем в ДВ и СДВ диапазонах.

В [10] рассмотрена проблема повышения эффективности функционирования передающего тракта радиотехнической системы СВ диапазона для обеспечения радиосвязи на поверхностной волне. Предложен метод дистанционного измерения входного импеданса антенны и согласования ее с фидером. Условием передачи в антенну максимальной мощности является согласование передающего тракта (радиопередающее устройство (РПДУ) – фидер – антенна), которое при использовании существующих РПДУ достигается при равенстве входного импеданса антенны волновому сопротивлению фидера. Это условие выполняется для антенны высотой в четверть длины волны на рабочей частоте. Установка на кораблях обеспечения (плавучих платформах) антенн, высота которых для СВ диапазона изменялась бы в таких пределах, невозможна. Реализуемая антенна должна иметь значительно меньшие размеры и может быть согласована с фидером только с помощью устройств, размещенных в их основании. Предложенный метод, не требующий измерения напряжения в основании антенны, позволяет разделить и разнести в пространстве измерительно-управляющую (блок

управления) и согласующую (блок согласования) части устройства согласования. При этом достигается существенное уменьшение размеров согласующей части, упрощается задача ее размещения в основании антенны, а также повышается надежность функционирования согласующего устройства (СУ).

При выборе варианта соединения элементов согласующего контура в составе блока согласования учитывается условие достижения максимального коэффициента бегущей волны на входе контура при подключении к его выходу антенны с измеренным входным импедансом. Выбор осуществляется путем расчета по всем возможным вариантам соединения элементов согласующего контура, для каждого из которых заранее измерены на сетке рабочих частот и занесены в память процессора значения входного импеданса.

Предложенный метод измерения входного импеданса и согласования антенны реализован в образце СУ [10]. Размеры блока согласования, наряду с возможностью передачи на него высокочастотного сигнала, сигналов управления и напряжения питания по одному коаксиальному кабелю, позволяют внедрить его в состав передающего тракта СВ диапазона с укороченной передающей антенной без доработки тракта. Проведенные на морской трассе натурные испытания антенны с СУ, в котором реализован предложенный метод [10], подтвердили увеличение уровня излучаемой мощности до 100 раз на частоте 1,5 МГц и прием на берегу всех переданных сообщений при использовании только 25% мощности передатчика.

Предложенное решение позволяет рассмотреть вариант создания РНС корабельного базирования с антенной с приемлемыми для указанного размещения массогабаритными характеристиками, что обеспечит покрытие акватории навигационным полем с лучшими точностными характеристиками, чем в ДВ и СДВ РНС берегового базирования, и на проектных дальностях до 1000 км [4, 7, 8].

В результате возникает перспектива совместного использования береговых и морских перемещаемых РНС для достижения топологии навигационных реперов, близкой к оптимальной по критерию минимального геометрического фактора местоопределения потребителя.

В районах, где требуются повышенные точность и устойчивость навигационных определений (сложный рельеф дна, узкие проходы вдоль береговой линии, интенсивный трафик, обслуживание подводных объектов и т.п.), могут быть оборудованы группы из 2-3 РНС берегового и 1-2 РНС морского базирования. Подобные группы послужат как резервным вариантом ГНСС, так и средством навигации на море, не предполагающим использование космического навигационного поля.

Рассмотрим особенности позиционирования на море, принимающего навигационные радиосигналы от группы РНС. Задача сводится к определению потребителем собственного местоположения путем навигационных измерений относительно опорных навигационных точек (ОНТ), пространственные координаты которых известны с определенной точностью (в нашем случае это координаты мобильных морских и береговых СВ РНС). В качестве измеряемых навигационных параметров принято использовать [4, 8] дальности (разности дальностей) между потребителем и ОНТ, угловые координаты, а в качестве измеряемых параметров сигналов – временную задержку распространения радиосигнала, фазу принимаемого от РНС колебания (разность фаз колебаний, переданных разнесенными в пространстве ОНТ).

Специфика решения навигационной задачи для морского потребителя по сети береговых и мобильных надводных СВ РНС состоит в том, что требуется оценить точностные характеристики процесса местоопределения потребителя в усло-

виях неизбежного дрейфа ОНТ морского базирования. Будем ориентироваться на ситуацию, когда сеть ОНТ состоит из 2-3 пунктов наземного и 1-2 пунктов морского базирования, совместная топология которых подлежит исследованию в целях определения степени деградации геометрического фактора позиционирования при отклонении рабочей конфигурации от оптимальной.

Для позиционирования береговых ОНТ могут быть привлечены традиционные средства геодезического обеспечения, навигационное поле ГНСС, группы соседних РНС, мобильные комплексы радиоинтерферометрических систем с длинной базой [11]. Обеспечение эфемеридами надводной ОНТ может быть выполнено либо по навигационному полю донных маяков [12], либо при использовании излучения РНС СВ, ДВ диапазонов берегового базирования. Дополнительные возможности повышения точности навигации может обеспечить режим дифференциальных определений, а также применение принципов мониторинга целостности навигационных полей, когда производится согласование получаемых результатов позиционирования путем выполнения взаимных измерений. Как показали исследования [4, 8], дополнительный неконтролируемый фазовый набег навигационный сигнал приобретает на границе «суша–вода», который далее практически сохраняет свое постоянство. Следовательно, полученные поправки к результатам дальномерных измерений по береговым РНС не теряют свою актуальность и могут доставляться потребителю вместе с навигационным сигналом, излучаемым надводной ОНТ.

Рассмотрим процесс местоопределения потребителя при использовании поверхностной волны РНС. В качестве точностной характеристики результата позиционирования примем геометрический фактор – отношение среднеквадратической погрешности (СКП) местоопределения к СКП измеряемого параметра.

При выполнении моделирования использованы дальномерные измерения и соответствующий метод определения координат на водной поверхности [8]. При этом одна из группы ОНТ представляет собой РНС морского базирования, остальные ОНТ – береговые.

Моделирование проведено для разных широт и долгот, чтобы наглядно оценить топологию геометрического фактора.

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 обеспечения указанных значений при использовании сети морских и береговых РНС. При этом продемонстрированы достижимые значения геометрического фактора при решении навигационной задачи при разном количестве используемых ОНТ и их различной групповой топологии.

Результаты компьютерного моделирования по определению местоположения потребителя приведены на рис. 1, *а, б, в, г*. В качестве ОНТ использована одна РНС морского базирования. Здесь эквипотенциальные линии – значения геометрического фактора. Как видно из рисунка, существует возможность заблаговременного выбора конфигурации РНС для обеспечения требуемого значения геометрического фактора в конкретной точке. Изменение геометрии группирования ОНТ осуществляется варьированием позиции РНС морского базирования.

Анализ приведенных результатов свидетельствует о достижимости приемлемых значений геометрического фактора при управляемом изменении позиции мобильной РНС надводного базирования.

В процессе моделирования было рассмотрено влияние систематических погрешностей на результат навигационных определений. Систематические погреш-

ности могут быть вызваны как влиянием регулярных факторов на трассу распространения радиосигналов, что приводит к погрешностям в определении дальностей от ОНТ до потребителя, так и неточностью знания местоположения передающих станций РНС. По характеру проявления влияние отмеченных типов систематической погрешности практически одинаково и проиллюстрировано на рис. 2–4.

Для анализа точности местоопределения надводного потребителя воспользуемся подходом, ориентированным на определение суммарной погрешности.

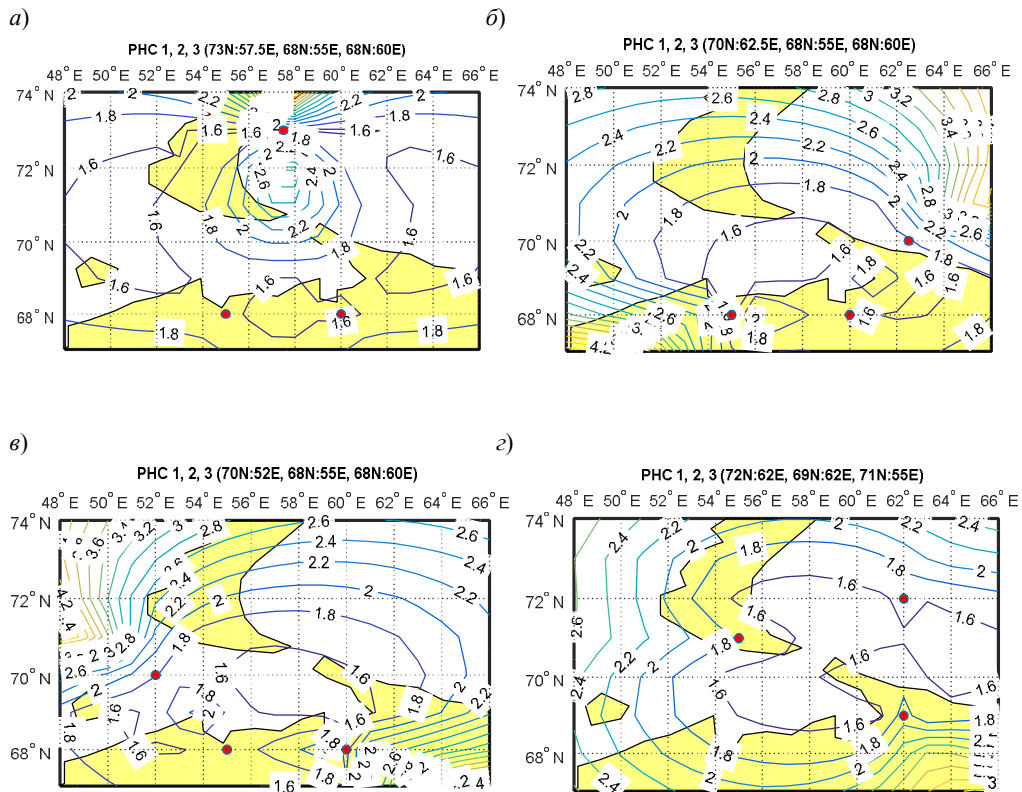


Рис. 1. Красные точки – позиции РНС

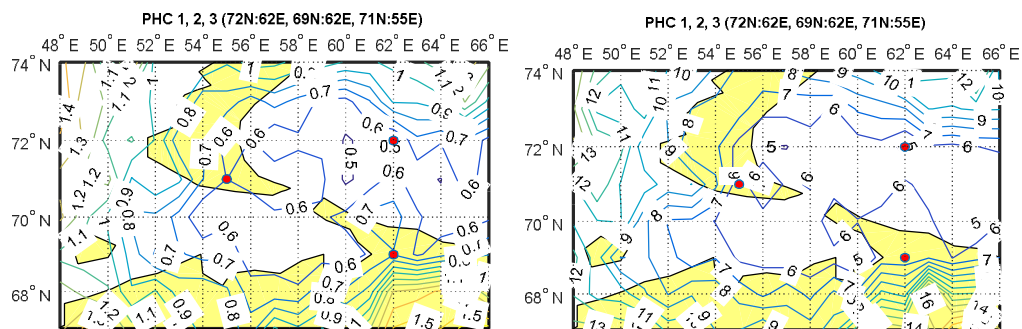


Рис. 2. Погрешность местоопределения при систематической погрешности 1 м

Рис. 3. Погрешность местоопределения при систематической погрешности 10 м

Основные слагаемые:

- погрешность собственного местоположения РНС;
- разность шкал времени потребителя и РНС;
- задержка сигнала в передающем тракте РНС;
- задержка сигнала вдоль трассы распространения волны;
- задержка сигнала в приемном тракте потребителя;
- случайная составляющая погрешности измерений.

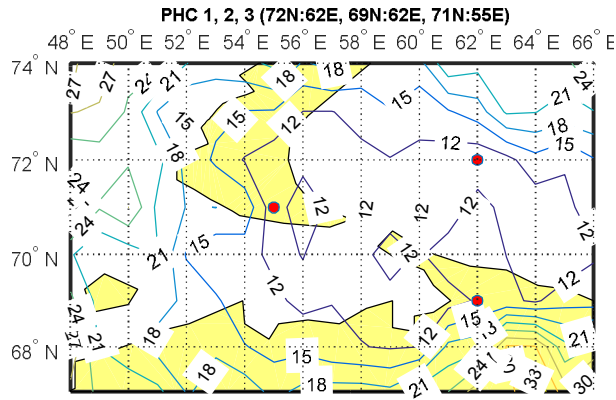


Рис. 4. Погрешность местоопределения при систематической погрешности 20 м

В рассматриваемой ситуации практически все компоненты имеют систематический характер за исключением погрешностей оценки местоположения РНС и измерений потребителя. Остановимся подробнее на каждой из перечисленных составляющих погрешностей.

Погрешность собственного местоположения РНС по сути определяется возможностями средств решения задачи местоопределения и средств, обеспечивающих парирование их динамики в пространстве. Собственное местоположение надводной РНС может быть определено с СКП в единицы метров (береговой – до 1 м). С учетом волнения моря в качестве гарантированного значения можно рассматривать точностную характеристику $3\sigma_{\text{рнс}} = 10$ м. Кроме того, в суммарной погрешности эфемерид РНС присутствует систематическая компонента [2], приводящая к предельной погрешности оценки координат потребителя, на уровне $\Delta_{\text{рнс}} = 5$ м. Для береговой РНС этот параметр также не превысит 1 м.

Современные системы радионавигации оснащены средствами СЕВ, имеющими достаточно высокую стабильность частоты и шкалы времени. Разность хода шкал времени потребителя и РНС оказывает заметное влияние при проведении беззапросных дальномерных измерений. Если же использовать режим расчета разностей дальностей, предполагающий измерение разностей фаз сигналов, поступающих от рабочих цепочек (ведущей и ведомой) РНС, либо дуплексный метод сличения шкал времени с береговыми РНС, то указанный тип систематической погрешности может быть практически полностью скомпенсирован. Во всяком случае, на фоне остальных составляющих представляется, что данная компонента не оказывает сколько-нибудь заметного влияния. По имеющимся оценкам [11] ее предельное значение составляет $\Delta_{\text{ш}} = 3$ м.

Задержка сигнала в передающем тракте РНС, как и задержка сигнала в приемном тракте потребителя, устраняется средствами калибровки измерительных трактов. Известно несколько отличающихся методик и подходов к оцениванию $\Delta_{\text{к}}$, которые непрерывно совершенствуются. По существующим оценкам [11] $\Delta_{\text{к}}$ не превысит 3 м.

Задержка сигнала вдоль трассы распространения поверхностной волны с учетом существующих моделей прогнозирования трассы распространения СВ-радиосигнала $\Delta_{\text{рв}}$ составит порядка 10 м (в дифференциальном режиме – 2-3 м). При этом следует иметь в виду, что данная оценка справедлива для «монотонной» морской поверхности. Если трасса распространения содержит «турбу-

лентности», неоднородности и другие возмущения, оценка может быть скорректирована в сторону роста.

Случайная составляющая погрешности измерений также зависит от ряда факторов: возможностей приемника и антенно-фидерного тракта, типа сигнала, энергетики радиолинии. При принятии нормального закона распределения погрешностей, как показал анализ, можно рассчитывать на СКП измерений в единицы метров [2]. С учетом этого обстоятельства примем $3\sigma_{\text{изм}} = 10\text{ м}$.

Приведенные рассуждения характеризуют погрешность измерений, выполняемых потребителем относительно РНС морского базирования. Для береговых РНС точностные характеристики заметно лучше.

На основе изложенного приведем выражение для полной оценки погрешности местоопределения потребителя:

$$P = \gamma \left(3\sqrt{\sigma_{\text{рис}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2} + \Delta_{\text{рис}} + \Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{к}} + \Delta_{\text{рв}} \right).$$

Здесь γ – значение геометрического фактора.

Оценочное значение предельной погрешности местоопределения надводного потребителя с использованием РНС морского базирования составит: $P_{\text{м}} = \gamma(13 + 5 + 3 + 3 + 10) = 34\gamma$ м.

Для РНС только берегового базирования представляется справедливым следующий вариант погрешности: $P_{\text{б}} = \gamma(10 + 1 + 3 + 3 + 3) = 20\gamma$ м.

При наличии возможности использования донной навигации для позиционирования РНС морского базирования представляется реальным приближение $P_{\text{м}}$ к $P_{\text{б}}$.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что в среднестатистической ситуации погрешность навигации на море при использовании поверхностных РНС не превысит десятков метров, поскольку значение геометрического фактора γ не выходит за границы 1,5-2 для типовых условий эксплуатации.

Заключение

В ходе проведенных исследований оценена возможность местоопределения на море по навигационным сигналам РНС СВ диапазона берегового и морского базирования путем решения следующих частных задач:

- обоснован механизм определения местоположения потребителя, ориентированный на процедуры решения обратной задачи;
- обозначены варианты эфемеридного обеспечения морских ОНТ по сигналам существующих и перспективных РНС;
- оценена погрешность местоопределения потребителя по сети ОНТ с учетом ее возможной динамики при использовании мобильных морских РНС.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность решения задачи местоопределения морского потребителя с погрешностью до 80 м. Дальнейшие исследования связаны с поиском путей программно-алгоритмической и макетной реализации предложенных решений, а также организацией проведения их экспериментальной проработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ривкин Б.С. Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 58 с.
2. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден приказом Минпромторга России от 31 августа 2011 г. № 1177.
3. Сафонов А.В. Повышение точности местоопределения радионавигационных систем средневолнового диапазона: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.12.04 Москва, 2004 124 с.: 61 04-5/3167.
4. Долуханов М.П. Распространение радиоволн: учебное пособие. М.: Связь, 1972. 336 с.
5. 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.
6. Модель ионосферы IRI-Plas [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/>.
7. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
8. Кинкулькин И.Е., В.Д. Рубцов, М.А. Фабрик. Фазовый метод определения координат. М.: Сов. Радио, 1979. 280 с.
9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.
10. 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.
11. Алёшкин А.П., Макаров А.А., Иванов Д.В., Ипатов А.В. Совершенствование координатно-временного и навигационного обеспечения по пути разработки технологии применения передвижных радиоинтерферометрических комплексов с длинной базой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. №6. С. 529–537.
12. Янжура А.С., Осадчий А.И., Бушманов С.М. Сопряжение подводных автоматизированных систем со спутниковым каналом связи // Информация и космос. 2017. № 4. С. 59–63.
13. Белов Л.Я., Паршин П.Н., Тюляков А.Е., Щенников Д.Л. Состояние и перспективы развития Государственной системы единого времени и частоты «Цель» в части объектов и средств МО РФ // Радионавигация и время. 2016. № 2. С. 3–16.
14. Зарубин С.П. Вклад Российского института навигации и времени в создание РНС наземного базирования // Радионавигация и время. 2017. № 3. С. 75–85.
15. Хохлов Н.С. Повышение надежности КВНО арктических транспортно-технологических систем при неблагоприятных условиях // I Санкт-Петербургский арктический конгресс «Арктика – территория объединения компетенций»: сборник трудов. 2018.

Aleshkin, A.P., Myslivtsev, T.O., Nikiforov, S.V., Semenov, A.A. (Mozhaiskiy Military Space Academy, St. Petersburg), **Arkhipova, I.G., Polienko, V.N.**, (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg) Features of Network Navigation Systems Construction for Surface Consumers Using Offshore Reference Points, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 4 (103), pp. 72–81.

Abstract. The paper addresses the problem of required positioning accuracy to be provided for a marine consumer. To improve the reliability of navigation measurements, an option of system implementation comprising both stationary onshore facilities and mobile offshore ones is proposed. In order to ensure appropriate range and accuracy of navigation using surface radio navigation aids (RNA), it is proposed to employ medium-wave radiation. Specific features of navigation measures within the selected range are studied in detail, which made it possible for the authors to develop particular technical recommendations and to formulate the accuracy estimations of marine consumer positioning using the proposed solutions under different conditions.

Key words: position measurement, positioning, consumer, navigation reference points, radio navigation systems, medium waves.

REFERENCES

1. **Rivkin, B.S.**, *Analiticheskiy obzor sostoyaniya issledovaniy i razrabotok v oblasti navigatsii za rubezhom* (Analytical Review of Navigation Research and Development Abroad), St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2017.
2. **Radio Navigation Plan of the Russian Federation**, approved by the Order No. 1177 of the Ministry of Industries and Trade of the Russian Federation, 31 August, 2011.
3. **Safonov, A.V.**, Increasing the accuracy of positioning of medium-wave radio navigation systems, *Cand. Sci. (Eng.) Dissertation*, Moscow, 2004, 124 p.
4. **Dolukhanov, M.P.**, *Rasprostraneniye radiovoln* (Radio Waves Propagation), Study Book, Moscow: Svyaz', 1972.
5. **Ortikov, M.Yu., Shemelov, V.A., Shishigin, I.V., and Troitsky, B.V.**, Ionospheric index of solar activity based on the data measurements of the spacecraft signals characteristics, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, no. 65, pp. 1425–1430.
6. **IRI-Plas Ionosphere Model** [online], available at: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/>.
7. **Al'pert, Ya.L.**, *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln i ionosfera* (Electromagnetic Waves Propagation and Ionosphere), Moscow: Nauka, 1972.
8. **Kinkul'kin, I.E., Rubtsov, V.D., and Fabrik, M.A.**, *Fazovyi metod opredeleniya koordinat* (Phase Method of Coordinates Determination), Moscow, Sovetskoe radio, 1979.
9. **Himmelblau, D.**, *Applied Nonlinear Programming*, Moscow, Mir, 1975 (Russian transl.).
10. **Arkipova, I.G., and Polienko, V.N.**, Method of remote measurement of impedance and HF transmission antenna matching with feeder, *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 9, pp. 71–73.
11. **Aleshkin, A.P., Makarov, A.A., Ivanov, D.V., and Ipatov, A.V.**, Improvement of coordinate and time navigation support by developing the technology of mobile radio-interferometric complexes with long baseline, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroeniye*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 529–537.
12. **Yanzhura, A.S., Osadchii, A.I., and Bushmanov, S.M.**, The interface of underwater-automated systems to a satellite link, *Informatsiya i kosmos*, 2017, no. 4, pp. 59–63.
13. **Belov, L.Ya., Parshin, P.N., Tyulyakov, A.E., and Shchennikov, D.L.**, The state system of the unified time and reference frequencies "The Goal" for the Ministry of Defense of the Russian Federation; its current status and development opportunities, *Radionavigatsiya i vremya*, 2016, no. 2, pp. 3–16.
14. **Zarubin, S.P.**, Contribution of the Russian Institute of Radionavigation and Time in land-based RNS development, *Radionavigatsiya i vremya*, 2017, no. 3, pp. 75–85.
15. **Khokhlov, N.S.**, Improvement of CTNS reliability for the Arctic transport and technological systems under adverse conditions, Proc. of the 1st St. Petersburg Arctic Congress "Arctic: the Territory of Integrated Competences", March 2018.

Материал поступил 19.09.2017