

CONSTRUCTION OF CONTROL SYSTEM OF DIFFERENTIAL SUBSYSTEM OF GLONASS/GPS WITH USE OF THE METHOD OF MATHEMATICAL PROCESSING OF SIGNAL PARAMETERS OF DIFFERENTIAL CORRECTION

S. F. Shakhnov, A. A. Ageeva

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper discusses the problems of construction of highly effective from the technical and economic point of view regional system for monitoring and managing of the local differential subsystem of the global navigation satellite system GLONASS/GPS, which provides the control of integrity both of the satellite navigation system and its differential subsystem, as well as consumer notification of all contingencies. The optimal structure of the control and management system of the differential subsystem on inland waterways of Russia is proposed. This system uses mid-wave frequency control and correction stations and includes regional control and management center, a network of remote control and management stations and a network of remote control points providing the control of integrity of the differential subsystem with the required discreteness in time. It is established that the necessity for a branched network of remote control points is caused by the strong influence of the underlying surface on the propagation of radio waves of the medium-wave range, as well as by the presence of considerable industrial disturbances and mutual disturbances from adjacent control and correction stations. The options of construction of an information network for data exchange between the elements of the considering system are suggested. A new method of quality control of a signal of the differential correction was developed. This method is based on the mathematical processing of signal parameters and leads to a significant simplification of the equipment of remote control points and, as a result, to a significant increase of the economic efficiency of the system implementation. The correspondence of the error probability of the piece-by-piece receiving of digital signal of the differential correction message to the permissible error probability was chosen as one of the criteria for the quality assessing. An expression for the error probability for incoherent receiving under the influence of fluctuation noise and also concentrated disturbances is presented in the article. The algorithm for calculation of the error probability was obtained. It includes the determination of the signal energy and the concentrated disturbance at the receiving point and the coefficient of mutual difference of the signal and noise. The structural scheme and composition of the equipment realizing the given algorithm are given.

Keywords: differential subsystem, control and correction station, remote control point, differential correction, control of integrity, error probability, mutual noises, coefficient of mutual difference, disturbance energy, signal quality criteria.

For citation:

Shakhnov, Sergei F., and Aleksandra A. Ageeva. "Construction of control system of differential subsystem of GLONASS/GPS with use of the method of mathematical processing of signal parameters of differential correction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 402–413. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413.

УДК 656.629, 621.396

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОПРАВКИ

С. Ф. Шахнов, А. А. Агеева

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассматриваются проблемы построения высокоэффективной, с технической и экономической точки зрения, региональной системы контроля и управления локальной дифференциальной подсисте-

мой глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS, обеспечивающей контроль целостности как самой спутниковой навигационной системы, так и ее дифференциальной подсистемы, а также оповещение потребителей обо всех нештатных ситуациях. Предложена оптимальная структура системы контроля и управления дифференциальной подсистемой на внутренних водных путях России, использующей контрольно-корректирующие станции средневолнового диапазона частот, включающая в себя региональный центр контроля и управления, сеть удаленных контрольно-управляющих станций и сеть удаленных пунктов контроля, обеспечивающих контроль целостности дифференциальной подсистемы с требуемой дискретностью по времени. Установлено, что необходимость в разветвленной сети удаленных пунктов контроля обусловлена сильным влиянием подстилающей поверхности на распространение радиоволн средневолнового диапазона, а также наличием значительных индустриальных помех и взаимных помех от соседних контрольно-корректирующих станций. Предложены варианты построения информационной сети для обмена данными между звеньями рассматриваемой системы. Разработан новый метод контроля качества сигнала дифференциальной поправки, основанный на математической обработке параметров сигнала, приводящий к существенному упрощению аппаратуры удаленных пунктов контроля и, как следствие, к существенному повышению экономической эффективности внедрения системы. Одним из критериев оценки качества выбрано соответствие вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сигнала сообщения дифференциальной поправки допустимой вероятности ошибки. Представлено выражение для вероятности ошибки при некогерентном приеме в условиях воздействия флуктуационного шума, а также сосредоточенных помех. Получен алгоритм расчета вероятности ошибки, включающий в себя определение энергии сигнала и сосредоточенной помехи в точке приема и коэффициента взаимного различия сигнала и помех. Приведена структурная схема и состав аппаратуры, реализующей данный алгоритм.

Ключевые слова: дифференциальная подсистема, контрольно-корректирующая станция, удаленный пункт контроля, дифференциальная поправка, контроль целостности, вероятность ошибки, взаимные помехи, коэффициент взаимного различия, энергетика помехи, критерии качества сигнала.

Для цитирования:

Шахнов С. Ф. Построение системы контроля дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS с использованием метода математической обработки параметров сигнала дифференциальной поправки / С. Ф. Шахнов, А. А. Агеева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 402–413. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413.

Введение

Повышение уровня безопасности плавания при навигации на внутренних водных путях (ВВП) России является одной из важнейших задач, стоящих перед внутренним водным транспортом. Ее решение связано с переходом от лоцманского метода судоходства к инструментальному, который позволяет в полной мере использовать высокую эксплуатационную скорость движения современных судов при одновременном повышении безопасности плавания, что особенно актуально в условиях постоянного роста интенсивности грузоперевозок на ВВП России. Развитие инструментальных методов проводки базируется на внедрении на речном флоте организационных и технических составляющих принятой Международной морской организацией (ИМО) концепции электронной навигации (e-Navigation), одной из основных составляющих которой является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS [1].

Особенностью использования спутниковых навигационных систем на ВВП являются высокие требования к точности позиционирования и дискретности определения целостности системы (соответствия спутников наблюдаемого созвездия их заданным эфемеридам). В зависимости от категории пути погрешность позиционирования на ВВП не должна превышать 1 – 5 м, а время принятия решения (при скорости 10 уз), и, следовательно, дискретность определения целостности системы — 20 – 30 с [2]. Указанная точность позиционирования для гражданских судов в настоящее время может быть обеспечена только при использовании дифференциального режима, создаваемого дифференциальной подсистемой ГНСС. При этом требуемая дискретность определения целостности системы может быть обеспечена только локальными дифференциальными подсистемами (ЛДПС), базирующимися на контрольно-корректирующих

станциях (ККС), работающих на границе МF-диапазона (283,5 – 325,0 кГц), дальность действия которых в речных условиях составляет порядка 200 – 400 км [3]. На таких расстояниях приемники ГНСС как ККС, так и судна используют при решении навигационной задачи одно и то же созвездие спутников. При этом в сообщения ККС, согласно международному стандарту RTSM SC 104 в. 2.2 (в. 2.3), помимо дифференциальной поправки (ДП), включается информация о номерах спутников, которые исключаются из рассмотрения при решении навигационной задачи и, следовательно, контроль целостности системы осуществляется практически в режиме реального времени [4].

При развертывании ЛДПС ГНСС на ВВП России возникла проблема контроля целостности не только ГНСС, но и самой ЛДПС, причем с той же высокой дискретностью. Частично эта проблема была решена уже на стадии разработки ККС, которая первоначально создавалась в морском варианте для обеспечения портовых акваторий и устьевых районов. Согласно [5], в состав ККС, помимо опорной станции (ОС), определяющей поправку и формирующей RTSM-сообщение для передачи потребителям, входит контрольная станция (КС), следящая за состоянием ОС и передатчика ККС и вносящая необходимые корректировки в работу этого оборудования, а также удаленная контрольно-управляющая станция (УКУС), следящая за состоянием сигнала дифференциальной поправки в одной удаленной точке.

Однако при работе ККС в речных условиях, возникли дополнительные проблемы, связанные с существенным влиянием неоднородной подстилающей поверхности на дальность распространения сигнала в МF-диапазоне [6], наличием существенных промышленных помех [7], а также взаимных помех от соседних ККС [8]. Последнее объясняется значительными размерами речных бассейнов, что наряду с требованием обеспечения сплошного поля дифференциальной поправки, приводит к созданию в бассейнах ВВП цепочек ККС с перекрывающимися зонами действия, в областях пересечения которых и возникают взаимные помехи. Все это и привело к необходимости создания в каждом бассейне сетей удаленных пунктов контроля (УПК), объединяемых в единую систему контроля и управления ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС/GPS и, соответственно, к необходимости проведения исследований в этой области [9]. В мировой практике подобные исследования еще не проводились, поэтому здесь необходимо опираться на фундаментальные труды в области создания сложных систем управления [10] и использовать опыт аналогичных работ, накопленный в смежных областях [11].

Целью представленного исследования является разработка методологии построения высокоэффективной с технической и экономической точек зрения региональной системы контроля и управления речной локальной дифференциальной подсистемой ГНСС ГЛОНАСС/GPS, базирующейся как на методах измерений, так и на методах математической обработки измеренных параметров.

Методология построения системы контроля и управления дифференциальной подсистемой ГНСС ГЛОНАСС/GPS

Организационно система контроля и управления ККС ЛДПС, так же, как и сама ЛДПС, в качестве звена нижнего уровня входит в разворачиваемую в настоящее время на ВВП России инфокоммуникационную триаду: КРИС (корпоративная речная информационная система) – РИС (речная информационная служба) – АСУ ДС (автоматизированная система управления движением судов). Поэтому эффективный синтез региональных систем контроля и управления дифференциальным полем, формируемым ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС/GPS, возможен только при комплексном рассмотрении всей глобальной системы в целом и ее внутренних связей между различными подсистемами. Т. е. синтез дифференциальных подсистем производится с учетом структуры и целеполагания систем верхнего уровня, каковыми являются перспективные КРИС – РИС – АСУ ДС, что позволит эффективно использовать выделяемые ресурсы и в полной мере обеспечить решение задачи повышения безопасности и эффективности судоходства на ВВП.

На первом этапе построения региональных систем контроля и управления ККС ЛДПС проводилось концептуальное исследование, которое осуществлялось на базе системного подхода [12]. Здесь требуется выбрать рациональный вариант структуры системы так, чтобы потенциальная эффективность этой системы в операции, направленной на достижение цели, была наибольшей. Заканчивается концептуальное исследование формированием рациональных требований к системе, которое достигается детальным исследованием технического и технико-экономического характера. Синтез систем контроля и управления дифференциальным полем относится к классу задач, для решения которых производится выработка варианта построения системы, в которой поставленная цель достигается при минимуме потребных ресурсов. В данном случае под ресурсом подразумевается мощность и количество передатчиков, стоимость выделяемых каналов связи, сложность и стоимость измерительной аппаратуры, численность и квалификация обслуживающего персонала и т. д.

В соответствии с Кодексом внутреннего водного транспорта Российской Федерации, ответственность за безопасность судоходства и, в частности, за навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов по ВВП, возлагается на бассейновые органы государственного управления на внутреннем водном транспорте, т. е. федеральные бассейновые управления (ФБУ) Администраций бассейнов. Развертывание РИС в рамках единой КРИС, так же как и внедрение речных ЛДПС ГНСС в рамках ФЦП «Глобальная навигационная система», осуществляется по бассейновому принципу, с перспективой обслуживания оборудования ККС после ввода их в эксплуатацию службами связи и радионавигации соответствующих Администраций бассейнов. В связи с большим объемом задач и особой важностью передаваемой информации для обеспечения безопасности судоходства региональную систему управления и контроля дифференциальной подсистемой ГНСС, разворачиваемую в пределах административных границ Администрации бассейна, также рационально создавать на базе Бассейновой службы оповещения в каждой Администрации бассейна. В целях экономии материальных и человеческих ресурсов речные ККС выполняются в автоматическом варианте. При этом КС вместе с рабочим местом оператора вынесена из ККС и располагается в УКУС.

Кроме того, в силу неоднородности подстилающей поверхности, влияющей на дальность распространения радиоволн в MF-диапазоне и, соответственно, на целостность поля дифференциальной поправки на ВВП, а также существенного изменения параметров подстилающей поверхности в течение навигационного периода, помимо УКУС, дополнительно необходимо использовать сеть удаленных пунктов контроля (УПК), представляющих собой автоматические центры записи и передачи параметров поля дифференциальной поправки, создаваемого ККС ЛДПС, и обеспечивающих оперативный контроль за качеством сигнала ДП на границах зон действия ККС.

Объединяющим элементом системы контроля и управления ККС ЛДПС является региональный центр управления и контроля (РЦУК), в задачи которого входит:

- гарантированное обеспечение высокоточной навигацией потребителей системы ГЛОНАСС на ВВП в зоне ответственности Администрации бассейна;
- компенсация последствий для потребителей возможного введения селективного доступа к гражданским сигналам системы GPS;
- обеспечение потребителей информацией о целостности ГНСС;
- непрерывный мониторинг параметров ККС из удаленных точек ее рабочей зоны;
- обеспечение целостности дифференциальной подсистемы;
- обеспечение информацией о целостности ДГНСС центра управления (ЦУ) соответствующей РИС, а также ЦУ РИС смежных бассейнов.

Структурная схема предлагаемой региональной системы управления и контроля ЛДПС представлена на рис. 1.

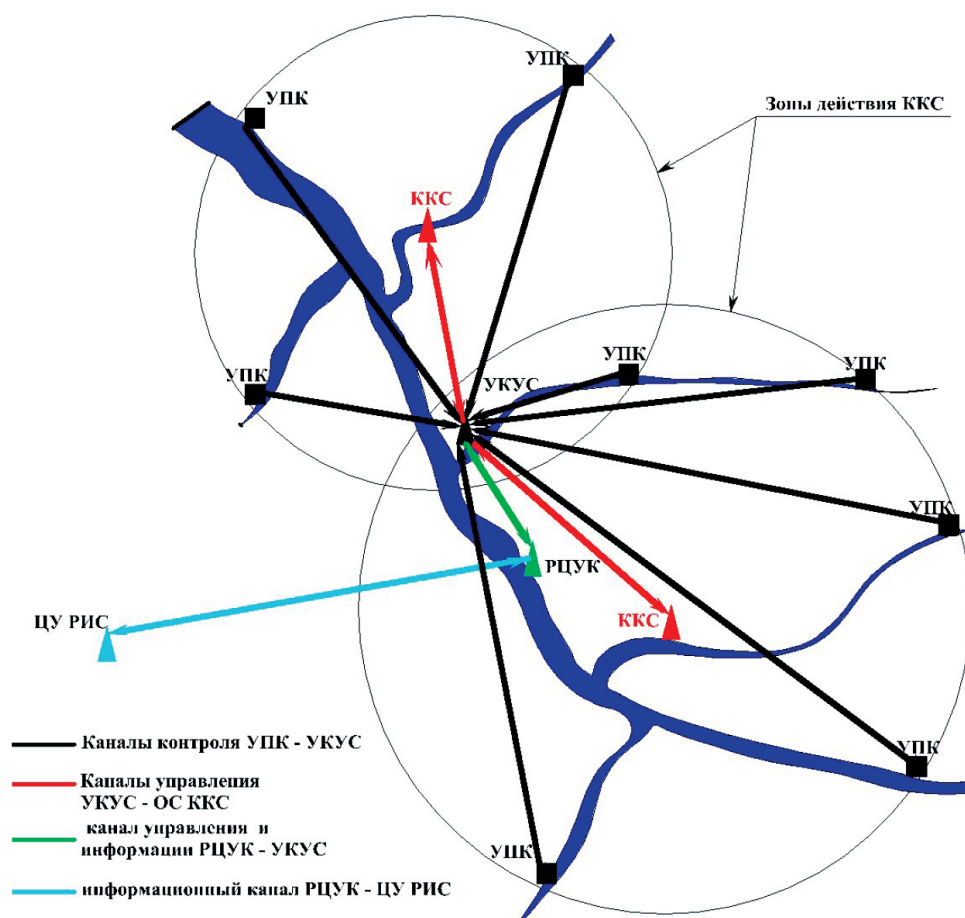


Рис. 1. Структура системы контроля и управления ККС ЛДПС

Исходя из целеполагания и структуры вышестоящей инфокоммуникационной триады, а также из целевой функции, определяющей минимизацию затрат материальных и технических ресурсов, РЦУК должен располагаться в бассейновом узле связи (БУС) соответствующего ФБУ, что позволяет существенно сэкономить ресурсы и обеспечить центр квалифицированным персоналом. По этим же причинам УКУС будут располагаться в линейных узлах связи (ЛУС).

Наибольшее влияние на обеспечение целевой функции, определяющей минимизацию затрат материальных и технических ресурсов, будет оказывать расположение и состав оборудования многочисленных УПК. При расположении контрольных точек вблизи ЛУС, УПК должны располагаться в этих структурах. В этом случае для создания сетей связи УПК – УКУС, так же, как и линии связи УКУС – РЦУК, могут быть использованы уже имеющиеся в ЛУС и БУС высокоскоростные выделенные линии сети Интернет. При расположении УПК в сельской местности, в зонах, где отсутствует покрытие высокоскоростной связью GSM технологии 4G и возможность подключения к выделенным линиям сети Интернет, для создания каналов связи УПК – УКУС может быть рекомендовано оборудование спутниковой связи технологии VSAT, стоимость которого, а также стоимость услуг связи в последнее время существенно снизились.

Основная минимизация затрат на создание региональной системы управления и контроля ЛДПС будет определяться составом измерительного оборудования многочисленных УПК и способами обработки представляемой информации.

В настоящее время существует только один сертифицированный вариант контрольно-измерительного оборудования для ККС — аппаратура мобильного мониторинга (АММ) КБ «Навис», которая должна устанавливаться в УКУС. Главным недостатком данной аппаратуры является ее высокая стоимость (около 500 тыс. руб. за комплект), что делает создание на ее базе региональ-

ной сети УПК экономически нецелесообразным. Высокая стоимость АММ объясняется двумя причинами: неспецифичностью оборудования для УПК и способом контроля качества передаваемого сигнала ДП.

Под неспецифичностью здесь понимается наличие широкого спектра функций, которые не используются при контроле параметров поля ДП в УПК, т. е. оборудование АММ не разработано специально под задачи, решаемые УПК и имеет широкий набор функций, в которых нет необходимости. Функциональная схема оборудования АММ приведена на рис. 2.

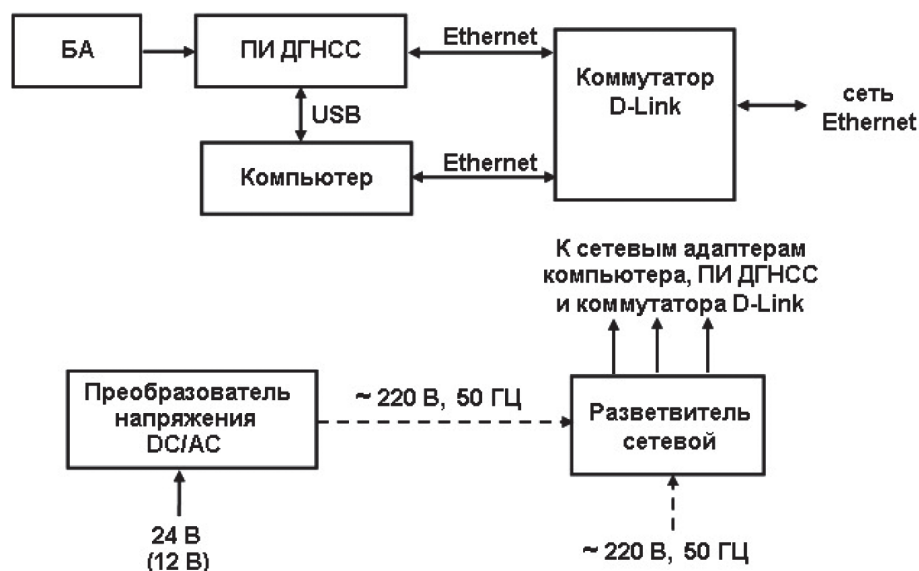


Рис. 2. Функциональная схема АММ ККС

АММ ККС предназначена для контроля работы дифференциальных станций методом оценки качества корректирующей информации, вырабатываемой ККС, обеспечивая:

- прием и обработку сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS;
- автоматическую непрерывную выработку координат с учетом принятых дифференциальных поправок, времени, курса и скорости движения;
- оценку точности определения координат места потребителя;
- прием, хранение и обновление альманахов ГНСС ГЛОНАСС и GPS;
- автоматический выбор созвездия из видимых НКА ГНСС ГЛОНАСС и GPS с учетом их технического состояния;
- прием и обработку сигналов ДП в соответствии с требованиями стандарта RTCM 10402.3;
- оценку качества принимаемого сигнала ДП (по уровню сигнала и соотношению сигнал / шум);
- автоматический контроль функционирования, индикацию неисправностей и отказов.

Из всех приведенных функций, для работы УПК необходимы только последние три, поэтому создание специализированного комплекта оборудования позволит существенно снизить стоимость аппаратуры УПК. Также значительного снижения стоимости оборудования УПК и его эксплуатации можно добиться изменением способа контроля качества передаваемого сигнала ДП. В аппаратуре АММ качество сигнала ДП контролируется путем измерения уровня сигнала и отношения сигнал / шум, а также посредством приема RTSM-сообщения, декодирования и определения количества ошибок. Основную стоимость при этом составляет аппаратура приема и декодирования RTSM-сообщения, а также стоимость объемного трафика между УПК и УКУС.

Авторами предлагается принципиально иной способ контроля качества сигнала ДП, основанный на вычислении вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сообщения (p_{err}). Критерием качества принимаемого сигнала ДП в этом случае будут условия:

$$\begin{cases} p_{\text{err}} < p_{\text{max}} \\ E_s > E_{\text{min}} \\ E_s / E_n > M \end{cases}, \quad (1)$$

где p_{max} — допустимая вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения; E_s — напряженность поля сигнала в точке приема; E_{min} — чувствительность приемника; E_n — напряженность поля помехи в точке приема; E_s / E_n — отношение сигнал / шум; M — пороговое значение отношения сигнал / шум.

Программное обеспечение для вычисления вероятности ошибки устанавливается на ПК в УКУС. Тогда структурная схема оборудования УПК примет вид (рис. 3).

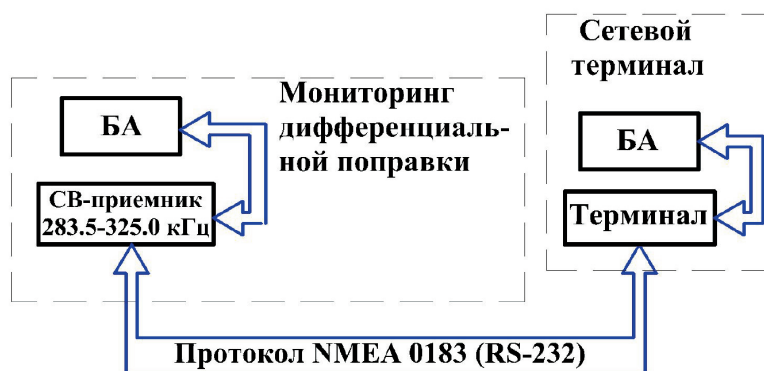


Рис. 3. Структурная схема оборудования УПК

Таким образом, аппаратура УПК будет включать в себя только приемник MF-диапазона с блоком антенным (БА), измеряющий уровень сигнала и отношение сигнал/шум, и терминал связи. При этом объем трафика по линии УПК – УКУС сокращается на несколько порядков, так как RTSM-сообщения обратно не транслируются, а передается только три контролируемых параметра.

Метод математической обработки параметров ДП, снимаемых аппаратурой УПК

Рассмотрим наиболее тяжелый случай — незамирающий сигнал и замирающая по релейскому закону взаимная помеха. Взаимные помехи, так же как и полезный сигнал, в нашем случае являются цифровыми с фазовой манипуляцией несущей. Кроме того, спектры фазоманипулированных сигналов являются перекрывающимися. Тогда при некогерентном приеме вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения будет определяться выражением [13]

$$p_{\text{err}} = -0,5 \exp \left[-\frac{h_{\text{eq}}^2}{2} \right] \cdot I_0(R_0 h_{\text{eq}}^2) + Q \left[\sqrt{\frac{h_{\text{eq}}^2}{2} (1 - \sqrt{1 - R_0^2})}; \sqrt{\frac{h_{\text{eq}}^2}{2} (1 + \sqrt{1 - R_0^2})} \right], \quad (2)$$

где Q — функция Маркума ($Q(y, z) = \int_z^\infty x \exp \left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2} \right] \cdot I_0(yx) dx$); $I_0(R_0 h_{\text{eq}}^2)$, $I_0(yx)$ — модифицированные функции Бесселя первого рода, нулевого порядка; $I_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(\pm z \cos \theta) d\theta$; h_{eq}^2 — эквивалентная энергетика сигнала при воздействии взаимных помех; R_0 , δ — параметры радиолинии ($R_0 = \delta / (1 - \delta)$)).

Для противоположных незамирающих сигналов и взаимных помех:

$$\delta = \sum_{k=1}^N \frac{g_{0k}^2 h_{nk}^2}{1 + h_{nk}^2}; \quad (3)$$

$$h_{eq}^2 = h_s^2 \left[1 - \sum_{k=1}^N \frac{g_{0k}^2 h_{nk}^2}{1 + h_{nk}^2} \right] = h_s^2 (1 - \delta), \quad (4)$$

где g_{0k}^2 — нормированный коэффициент взаимного различия сигнала и k -й помехи; h_s^2, h_{nk}^2 — энергетика сигнала и k -й помехи соответственно; N — число взаимных помех.

Здесь энергетика сигнала или помехи — безразмерная величина, определяемая выражением

$$h^2 = \frac{PT}{v^2}, \quad (5)$$

где P — мощность сигнала или помехи на входе приемника; T — длительность посылки сигнала; v^2 — спектральная плотность белого флуктуационного шума.

Так как сигнал и взаимные помехи имеют одинаковую структуру, в этом случае для оценки сверху (сдвиг начала манипуляции помехи относительно сигнала равен нулю) нормированный коэффициент взаимного различия будет определяться выражением [14]:

$$g_{0k}^2 = \left\{ \frac{\sin[0,5\Omega_{nk}T]}{0,5\Omega_{nk}T} \right\}^2, \quad (6)$$

где Ω_{nk} — расстройка несущей частоты сигнала и помехи.

Мощность сигнала на входе приемника определяется известным выражением

$$P = \frac{E^2 S_{\text{eff}}}{120\pi}, \quad (7)$$

где S_{eff} — эффективная площадь антенны.

Тогда алгоритм обработки параметров поля сигнала будет следующим. Измеренная напряженность поля сигнала и помех передается в УКУС. В процессоре ПК с помощью установленной программы обработки по формуле (7) вычисляется мощность сигнала и помех. Затем по (5) – (6) вычисляются энергетика сигнала и помех и коэффициенты взаимного различия. Далее по (3) – (4) вычисляются параметры радиолинии и эквивалентная энергетика сигнала при наличии помех. По полученным данным из формулы (2) находят вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения и оценивают качество принимаемого сигнала по критерию (1).

Обсуждение

На рис. 4 приведена структура перспективной региональной систем контроля и управления дифференциальным полем, формируемым локальными функциональными дополнениями ГНСС ГЛОНАСС/GPS в зоне ответственности ФБУ Администрация Волго-Балтийского бассейна судоходства. Как видно из рисунка, в системе контроля имеется 11 УПК, семь из которых расположены в ЛУС и будут иметь высокоскоростной выход в Интернет. Поэтому в качестве терминала связи в них будут устанавливаться маршрутизаторы сети Интернет, которые предоставляются провайдерами бесплатно.

В остальных УПК в качестве терминала связи будет использоваться комплект спутникового оборудования технологии VSAT (ориентировочная стоимость одного комплекта 30 тыс. руб.). При установке в каждом УПК сертифицированного АММ КБ НАВИС общая стоимость оборудования всех УПК без стоимости установки составит 5 млн 620 тыс. руб. ($11 \cdot 500 + 4 \cdot 30$).

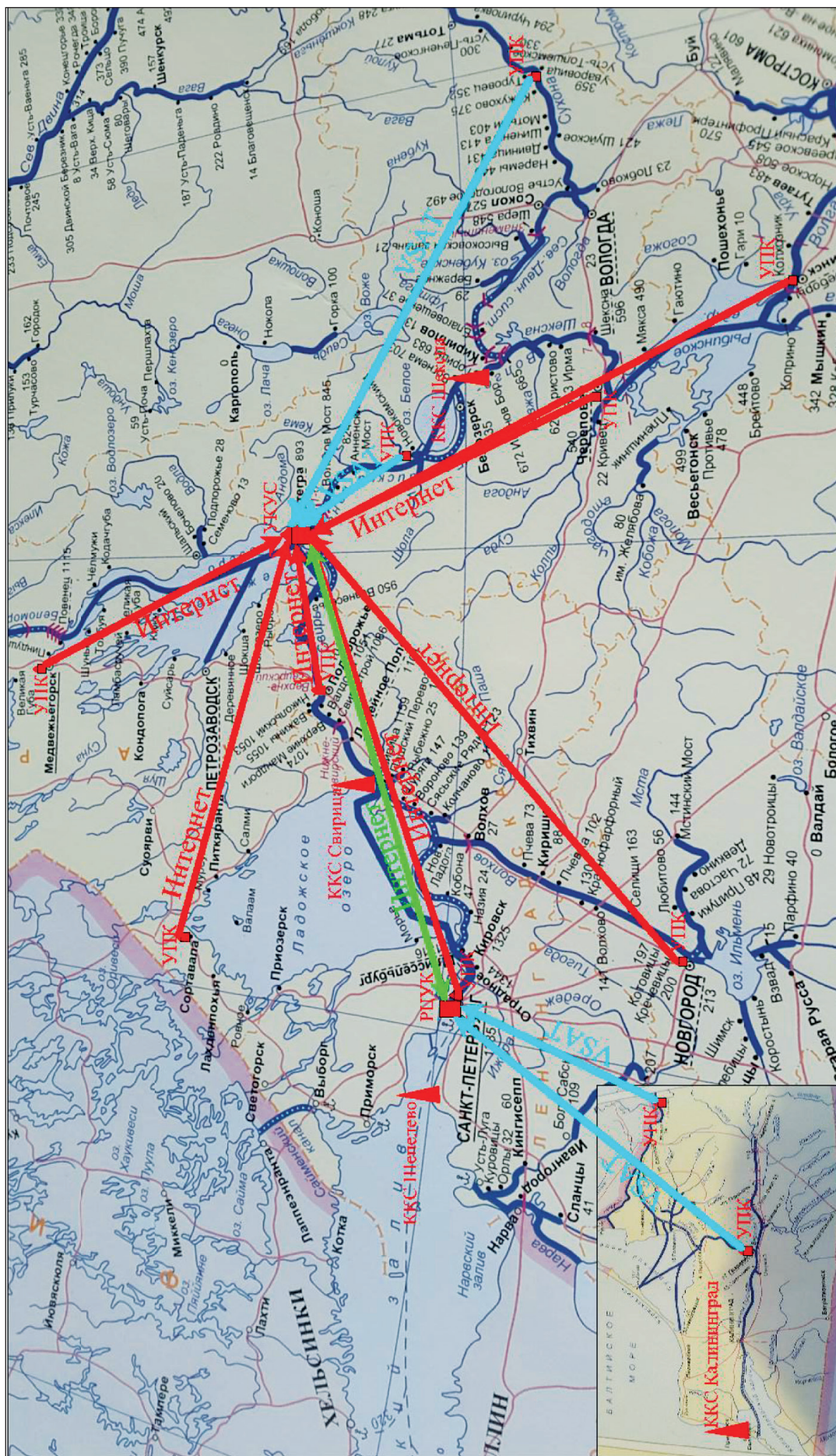


Рис. 4. Структура информационной сети региональной системы контроля и управления дифференциальным полем ФБУ «Администрация Волго-Балт»

Как видно из этого примера, основную стоимость составляет оборудование контроля качества сигнала ДП. При использовании предлагаемого метода математической обработки параметров сигнала в качестве измерительной аппаратуры для УПК может быть предложен приемник ПКИ-Х4 (рис. 5), собранный на одной печатной плате.



Рис. 5. Внешний вид ПКИ-Х4

Плата может быть установлена как в корпусе ПК, так и в отдельном корпусе. Стоимость данного прибора вместе с антенной составляет около 30 тыс. руб. В этом случае общая стоимость оборудования всех УПК составит 450 тыс. руб. ($11 \cdot 30 + 4 \cdot 30$).

Таким образом, благодаря внедрению предложенного алгоритма математической обработки параметров сигнала, стоимость оборудования УПК в рассмотренном примере может быть снижена на порядок. Кроме того, в связи с крайне незначительным объемом трафика, даже при расположении УПК в сельской местности, где отсутствует покрытие сетью связи стандарта GSM-технологии 4G, в перспективе, по мере охвата этих районов технологиями 3G или 2G, появится возможность даже в них отказаться от спутникового оборудования связи.

Параметры M , N , T , v^2 , $p_{\max}$, $E_{\min}$, $\Omega_{\text{нк}}$ и $S_{\text{эфф}}$ входящие в выражения (2) – (7), являются заданными. Порог чувствительности приемника ДП ($E_{\min}$) составляет 23 дБ·мкВ. Минимальное соотношение сигнал/шум (M), обеспечивающее надежный прием сигнала, составляет 10 дБ. Длительность посылки импульса (T), согласно стандарту RTSM SC 104 v. 2.2 (v. 2.3), составляет 10 мс. Также в соответствии с этим стандартом, длина RTSM-сообщения составляет 700 бит, поэтому допустимая вероятность поэлементного приема ($p_{\max}$), обеспечивающая верность принятия сообщения, составляет 10^{-3} . Число взаимных помех (N), определяется количеством ККС, доступных в точке установки УПК. Расстройка частоты сигнала и помехи ($\Omega_{\text{нк}}$) определяется разностью несущих частот ККС, доступных в точке установки УПК.

Заключение

1. В работе обоснована необходимость создания системы постоянного контроля за дифференциальной подсистемой ГНСС ГЛОНАСС/GPS.
2. Представлена концепция построения эффективной структуры системы контроля и управления, как составной части инфокоммуникационной триады: КРИС – РИС – АСУ ДС.
3. Обоснована необходимость создания широкой сети УПК, обусловленная существенным влиянием подстилающей поверхности на топологию поля ДП и изменчивостью ее электрических параметров в течение навигационного периода.
4. Предложен новый метод оценки целостности параметров дифференциальной подсистемы по критерию соответствия вероятности ошибки поэлементного приема ее допустимому значению, основанный на математической обработке параметров сигнала ДП.

5. Разработан алгоритм расчета вероятности ошибки в условиях влияния флуктуационных и взаимных помех, достаточно простой в реализации. Для создания программного обеспечения метода может быть использовано любое известное приложение, имеющее готовые подпрограммы расчета функций Маркума и Бесселя (Mathlab, Mathcad и т. д.).

Использование предложенного метода позволяет существенно упростить аппаратуру УПК и, соответственно, снизить расходы по развертыванию системы управления и контроля. Также применение данного метода приводит к существенному снижению трафика и, как следствие, возможности во многих случаях отказаться от аппаратуры спутниковой связи на линиях УПК – УКУС. В качестве направления дальнейших исследований по данной теме может быть предложено рассмотрение возможности учета влияния промышленных помех при расчете вероятности ошибки поэлементного приема, а также вопросы построения полностью автоматической системы оповещения потребителей о нештатных ситуациях в дифференциальной подсистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л. Л. Современные информационные технологии в судовождении / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: ОНМА, 2013. — 135 с.
2. Каретников В. В. Использование речной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях Российской Федерации при проведении путевых работ / В. В. Каретников, Р. В. Волков, Г. В. Киселевич // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 63–68.
3. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2008. — 352 с.
4. RTSM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Future Version 2.2, RTSM Paper 88-97 / SC 104-156, July 15, 1977.
5. ГОСТ Р 56055. Глобальная навигационная спутниковая система. Морская дифференциальная подсистема. Проектирование контрольно-корректирующих станций. Общие требования. — М: Стандартинформ, 2015. — 18 с.
6. Шахнов С. Ф. Расчет функции ослабления поля контрольно-корректирующих станций с учетом влияния подстилающей поверхности / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 116–123.
7. Шахнов С. Ф. Виды промышленных помех и их влияние на радиолнии дифференциальных подсистем речных АСУ движением судов / С. Ф. Шахнов // Информатизация и связь. — 2015. — № 1. — С. 33–36.
8. Шахнов С. Ф. К расчету помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы при использовании детерминированных сигналов и взаимных помех / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 24–30.
9. Каретников В. В. Построение системы управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС на Северном морском пути / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 166–172.
10. Квейд Э. Анализ сложных систем: пер. с англ. / Э. Квейд. — М.: Сов. радио, 1979. — 519 с.
11. Курносов В. И. Методология проектных исследований и управления качеством сложных технических систем электросвязи / В. И. Курносов, А. М. Лихачев. — СПб.: Тирекс, 1999. — 496 с.
12. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара; пер. с англ. Э. Л. Наппельбаума; под ред. В. С. Емельянова. — М.: Мир, 1978. — 312 с.
13. Шахнов С. Ф. Помехозащищенность и устойчивость радиолний речных дифференциальных подсистем ГНСС ГЛОНАСС/GPS: монография / С. Ф. Шахнов. — СПб.: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. — 170 с.
14. Сикарев И. А. Методология расчета помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS / И. А. Сикарев, С. Ф. Шахнов, Г. В. Киселевич // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2015. — № 1. — С. 88–93.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L. L. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v sudovozhdenii*. Odessa: «ONMA», 2013.
2. Karetnikov, V. V., R. V. Volkov, and G. V. Kiselevich. "To the question of use river differential subsystem GLONASS / GPS on the inland Russian waterways at carrying out of track works." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 63–68.
3. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. *Topologiya differentsial'nykh polei i dal'nost' deistviya kontrol'no-korrektiruyushchikh stantsii vysokotochnogo mestoopredeleniya na vnutrennii vodnykh putyakh*. SPb.: SPGUVK, 2008.
4. RTSM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Future Version 2.2, RTSM Paper 88-97 / SC 104-156, July 15, 1977.
5. Russian Federation. State Standart GOST R 56055. Global navigation satellite system. Maritime differential subsystem. Reference integrity monitoring stations design. General requirements. M: Standartinform, 2015.
6. Shakhnov, S. F. "Calculation of function field weakening of the control and correction stations taking into account the influence of the underlying surface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 116–123.
7. Shakhnov, S. F. "Types of industrial disturbances and its impact on radiolines of the differential subsystems of river AIS vessel traffic." *Informatization and communication* 1 (2015): 33–36.
8. Shakhnov, S. F. "To calculation of the noise-protection of the radio channels of river LDSS with the use of the deterministic signals and mutual disturbances." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 24–30.
9. Karetnikov, Vladimir Vladimirovich, Ivan Vladimirovich Pashchenko, and Andrei Igorevich Sokolov. "Bilding a sistem of management and control high-precision differential field GLONASS on the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 166–172.
10. Kveid, E. *Analiz slozhnykh sistem*. M.: Sov.radio, 1979.
11. Kurnosov, V. I., and A. M. Likhachev. *Metodologiya proektnykh issledovaniy i upravleniya kachestvom slozhnykh tekhnicheskikh sistem elektrosvyazi*. SPb.: Tireks, 1999.
12. Mesarovich, M., and Ya. Takakhara. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy*. Edited by V. S. Emel'yanov. M.: Mir, 1978.
13. Shakhnov, S. F. *Pomekhozashchishchennost' i ustoichivost' radiolinii rechnykh differentsial'nykh podsistem GNSS GLONASS/GPS: monografiya*. SPb.: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo", 2015.
14. Sikarev, I. A., S. F. Shakhnov, and G. V. Kiselevich. "Methodology of the calculation of the noise protection of the radio channels of river local differential subsystem GLONASS/GPS." *Information Security Problems. Computer Systems* 1 (2015): 88–93.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шахнов Сергей Федорович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sfshah@yandex.ru, kaf_svvp@gumrf.ru
Агеева Александра Анатольевна —
специалист по НТИ
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ageevaalexandra.gumrf@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shakhnov, Sergei F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sfshah@yandex.ru, kaf_svvp@gumrf.ru
Ageeva, Aleksandra A. —
Specialist in scientific and technical information
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ageevaalexandra.gumrf@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.