

МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ ПОЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОПРАВКИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СЕТИ КОНТРОЛЬНО-КОРРЕКТИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ

Шахнов С.Ф., д.т.н., доцент, профессор кафедры Судоводства на внутренних водных путях ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адм. С.О. Макарова», e-mail: shahnovsf@gumrf.ru

Смоленцев С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Автоматики и вычислительной техники ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адм. С.О. Макарова», e-mail: SmolentsevSV@gumrf.ru

Буцанец А.А., к.т.н., начальник отдела НТИ и ИС ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

Иванова А.А., специалист по НТИ ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова», e-mail: uid@gumrf.ru

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE TOPOLOGY OF THE DIFFERENTIAL CORRECTION FIELD WHEN CONSTRUCTING A NETWORK OF REFERENCE INTEGRITY MONITORING STATIONS

Shakhnov S.F., Smolentsev S.V., Butsanets A.A., Ivanova A.A.

River information services (RIS) on inland waterways (IWW) of Russia are designed to ensure safe and cost-effective navigation by providing navigators, shipowners and inland waterway basins Administrations with a standard set of information services. One of the conditions for the technical implementation of the RIS concept is the coverage of inland waterways with a continuous differential correction field, the creation of which requires the construction of an optimal topology of a network of reference integrity monitoring stations (RS) of local differential subsystems (LDSS) of GNSS GLONASS. To build it, it is also necessary to take into account factors affecting the reference stations range. One of these factors, namely, noises of various natures is examined in the paper. A methodology for calculating the reference stations range is presented. An approach that takes into account the dependences of the electric-field strength on frequency for various types of noises has been demonstrated. Using the approach it becomes possible to simplify the algorithm for calculating the reference stations range. It is noted that when implementing the presented algorithm, it is particularly difficult to determine an attenuation function. An example of the application of the developed algorithm in calculating the coverage areas of the reference integrity monitoring stations network in the Krasnoyarsk region in the Yenisei basin is given. As a result, the presented methodology for calculating the reference integrity monitoring stations range, taking into account noises of various natures, makes it possible to optimize the topology of the differential field when constructing a telecommunication system for distributing and monitoring corrective information.

Key word: River information services, RIS, differential correction, control and correction station, reference station, reference integrity monitoring station, system for distributing and monitoring corrective information, calculation algorithm, reference stations network, probability of error.

Ключевые слова: речная информационная служба, дифференциальная поправка, контрольно-корректирующая станция, система распространения и контроля корректирующей информации, алгоритм расчета, сеть ККС, вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации (РФ) наметился переход к практической реализации концепции речных информационных служб (РИС) на внутренних водных путях (ВВП) РФ. Данная концепция базируется на опыте создания River Information Services (RIS) на ВВП Европейского союза, важнейшей составляющей которой является Служба движения судов (Vessel Traffic Service (VTS)) [1].

РИС на ВВП РФ будут разворачиваться по бассейновому принципу на базе Администраций бассейнов ВВП и предназначаются для обеспечения судоводителей, судовладельцев и

Речные информационные службы (РИС) на внутренних водных путях (ВВП) России предназначены для обеспечения безопасного и экономически эффективного судоходства путем предоставления судоводителям, судовладельцам и Администрациям бассейнов внутренних водных путей стандартного набора информационных услуг. Одним из условий технической реализации концепции РИС является покрытие внутренних водных путей сплошным полем дифференциальной поправки, для создания которого требуется построение оптимальной топологии сети контрольно-корректирующих станций (ККС) локальных дифференциальных подсистем (ЛДПС) ГНСС ГЛОНАСС. Для её построения необходимо в том числе учитывать факторы, влияющие на дальность действия ККС. В данной работе рассмотрен один из таких факторов – это шумовые помехи различной природы. Представлена методология расчета дальности действия ККС. Продемонстрирован подход, учитывающий зависимости напряженности поля различных видов шумов от частоты, с помощью которого становится возможным упростить алгоритм расчета дальности действия ККС. Отмечено, что при реализации представленного алгоритма особую сложность представляет определение функции ослабления. Приведен пример применения разработанного алгоритма при расчете зон действия сети ККС в районе Красноярск в бассейне Енисея. В результате представленная методология расчета дальности действия ККС с учетом шумовых помех различной природы позволяет оптимизировать топологию поля дифференциальной поправки при построении телекоммуникационной системы распространения и контроля корректирующей информации.

Администраций бассейнов стандартным набором информационных услуг, обеспечивающих безопасное и экономически эффективное судоходство и охрану окружающей среды.

Важной технической составляющей концепции РИС является обеспечение ВВП РФ высокоточным навигационным полем, создаваемым глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). Для выполнения этого условия требуется создание на ВВП сплошного поля дифференциальной поправки (ДП), обеспечивающего необходимую точность местоопределения в 1÷2 м [2].

В рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» [3] было определено, что для создания поля дифференциальной поправки на ВВП России должна быть создана сеть контрольно-корректирующих станций (ККС) локальных дифференциальных подсистем (ЛДПС) ГНСС ГЛОНАСС, работающих в диапазоне морской радиомаячной службы (283.5÷325.0 кГц). То есть, должна быть создана телекоммуникационная система распространения и контроля корректирующей информации.

При создании сплошного поля дифференциальной поправки встал вопрос о построении оптимальной топологии сети ККС, для чего необходимо определить оптимальное количество ККС, их местоположение и дальность действия с учетом существенного влияния подстилающей поверхности [4, 5].

При этом, построение оптимальной телекоммуникационной системы распространения корректирующей информации производилось с учетом шумовых помех различной природы, оказывающих влияние на дальность действия ККС.

Методы и материалы

Методология определения дальности действия ККС базируется на известном соотношении между вероятностью ошибки элементарного приема цифрового сообщения h^2 и энергетикой сигнала h^2 в условиях воздействия функционального шума [6,7]

$$p_{err.} = 0,5 \exp(-0,5h^2). \quad (1)$$

Здесь энергетика сигнала определяется соотношением

$$h^2 = \frac{P_c \cdot T}{v^2}, \quad (2)$$

где P_c – мощность сигнала в точке приема; T – длительность посылки; v^2 – спектральная плотность функционального шума.

Тогда граница устойчивой зоны действия ККС будет определяться условием

$$p_{err.} < p_{дон.} \quad (3)$$

Мощность на входе приемника связана с напряженностью дифференциального поля E известным соотношением [7]

$$P_c = \frac{E_c^2 L_d^2}{4R_a}, \quad (4)$$

где E_c – напряженность поля сигнала на антенне; L_d –

действующая высота антенны; R_a – активное сопротивление антенны.

Напряженность поля ДП, необходимая для вычисления мощности и энергетика сигнала на приеме, определяется из выражения [8]

$$|E(D)| = -\frac{3 \cdot 10^5 \sqrt{P}}{D} w(D) \text{ мВ/м}, \quad (5)$$

где P – мощность передатчика в кВт; D – расстояние до точки приема в км; $w(D)$ – функция ослабления, которая может быть определена по методике, изложенной в работе [9].

Шумы на приеме будут складываться из внутренних шумов приемника и внешних шумов. Согласно рекомендации RTCM 104 версии 2.3 полоса частот передатчика ДП составляет 200 Гц. Поэтому спектральная плотность шума в полосе частот полезного сигнала практически постоянна, и ее величина будет определяться выражением [10]

$$v^2 = P_{ш} \cdot \Delta f_c \quad (6)$$

где $P_{ш}$ – мощность шумовой помехи на входе приемника; Δf_c – полоса частот полезного сигнала.

Для расчета мощности помехи на входе приемника также используется выражение (4)

$$P_{ш} = \frac{E_{ш}^2 L_d^2}{4R_a}, \quad (7)$$

где $E_{ш}$ – напряженность поля помехи на антенне.

На ВВП РФ основными внешними шумами являются: атмосферные шумы; космические шумы; среднестатистические индустриальные шумы [11]. Кроме того, существенное влияние имеют местные (локальные) индустриальные шумы.

При наличии внешних и внутренних шумов, общая напряженность поля шумовых помех, наводимых возле антенны в шумовой полосе 1 кГц, будет определяться выражением

$$E_{ш} = \sqrt{E_{вне}^2 + E_{вн}^2}. \quad (8)$$

Суммарное значение напряженности поля внешних помех $E_{вне}$ будет равно:

$$E_{вне} = \sqrt{E_{н1}^2 + \dots + E_{нn}^2}. \quad (9)$$

Здесь в выражениях (8) и (9) E имеет размерность [мкВ/м√кГц].

Мощность шума в приемнике, приведенная ко входу, будет определяться выражением

$$P_{шн} = k T_{шн} \Delta f_{ш}, \quad (10)$$

где k – постоянная Больцмана; $T_{шн}$ – шумовая температура приемника; $\Delta f_{ш}$ – шумовая полоса.

Тогда напряженность внутреннего шума, приведенная к антенне, с учетом выражения (7), будет равна

$$E_{вн} = \frac{\sqrt{4k T_{шн} R_a \Delta f_{ш}}}{L_d}. \quad (11)$$

Выражения (1)÷(11) и будут определять методологию расчета дальности действия ККС. При этом, дальность действия ККС в заданном направлении будет определяться максимальным значением D , при котором еще выполняется условие (3).

Результаты

Результаты исследований уровней шумов [12-13], приведены на рис. 1.

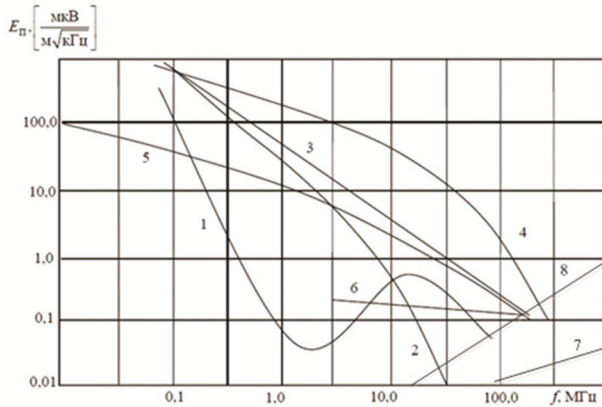


Рис. 1. Зависимость напряжённости поля шумовых помех возле антенны от частоты: 1 – средний уровень атмосферных помех днём; 2 – атмосферные помехи ночью; 3 – при местной грозе; 4 – средний уровень промышленных помех в городе; 5 – в сельской местности; 6 – максимальный уровень космических помех; 7 – шум спокойного Солнца; 8 – шум приемника

Из рис. 1 видно, что атмосферные шумы днем много меньше, чем атмосферные шумы ночью. Также средние промышленные шумы в городе значительно превышают среднестатистические промышленные шумы в сельской местности.

Кроме того, из графиков видно, что космические шумы и шумы спокойного Солнца в полосе частот морской радиомаячной службы (среднее 300 кГц) практически отсутствуют.

Также на этих частотах пренебрежительно малы собственные шумы приемника, что существенно облегчает работу при реализации алгоритма расчета дальности действия ККС по формулам (1)-(11), так как определение шумовой температуры приемников разных типов представляет большую сложность из-за проблем с получением исходных данных. Таким образом, в нашем случае $E_{ш} = E_{вне}$.

Рекомендации RTCM 104 версии 2.3 не определяют требований к антеннам приемников дифференциальной поправки, поэтому использование выражения (7) в алгоритме расчета дальности действия ККС является весьма затруднительным, так как производители используют антенны различных типов и параметров.

Поэтому, с учетом того, что в нашем случае в достаточно узкой полосе полезного сигнала спектральная плотность шумовой помехи может считаться постоянной, выражение (2) может быть преобразовано

$$h^2 = \frac{P_c T}{v^2} = \frac{P_c T \Delta f_c}{v^2 \Delta f_c} = \frac{2P}{P_{ш}} = \frac{2E^2}{E_{ш}^2},$$

Здесь $\Delta f_c = 2 / T$, а согласно рекомендации RTCM 104 версии 2.3, T составляет 10 мс.

Таким образом, алгоритм расчета дальности действия ККС существенно упрощается и будет включать в себя только выражения (1), (3), (5) и (9). При расчете напряженности шумовой помехи по формуле (9) будут

учитываться только две составляющие: атмосферные шумы в ночное время и среднестатистические промышленные шумы в сельской местности, так как в подавляющем большинстве случаев, границы зон действия ККС будут находиться именно там. При этом для определения значений этих шумов можно непосредственно воспользоваться графиком на рис.1.

Обсуждения

Основную трудность при реализации представленного алгоритма представляет определение функции ослабления в выражении (5). Она описывается уравнением Хаффорда, которое представляет собой интегральное уравнение Вольтерры второго рода [5]

$$w(D) = 1 + i \sqrt{\frac{kD}{2\pi}} \int_0^D w(x) \left[\frac{1}{\sqrt{\varepsilon(x)}} + \sin\left(\frac{D-x}{2a}\right) \right] \times \exp\left(ik \frac{x D(D-x)}{8a^2}\right) \times \frac{dx}{\sqrt{x(D-x)}}, \quad (13)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны; a – радиус Земли; $\varepsilon(x)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности; x – расстояние от источника до текущей точки интегрирования.

Для численного решения этого уравнения разработано программное обеспечение в программной оболочке MATLAB.

На рис. 2 представлены результаты расчета зон действия сети ККС в районе Красноярск в бассейне Енисея, выполненные с применением разработанного алгоритма. В расчетах использовались передатчики мощностью 0,4 кВт. Так как согласно рекомендации RTCM 104 v2.3 максимальная длина сообщения не может превышать 800 знаков, то допустимая вероятность поэлементного приема двоичного сигнала была принята равной 10^{-3} .

Заключение

Представленные результаты исследований уровней шумов (рис. 1) позволяют определять величину напряженности поля различных видов внешних шумов и внутреннего шума приемника в зависимости от частоты. Поскольку ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС, формирующая поле дифференциальной поправки на ВВП России, работает в диапазоне частот морской радиомаячной службы (283,5-325,0 кГц), то при расчетах можно пренебречь влиянием таких видов шумовых помех как космические помехи, шум спокойного Солнца и собственные шумы приемника и исключить их величины из выражения для расчета напряженности шумовой помехи (9). Кроме того, расчеты производятся для худшего случая – работы ККС в ночное время, когда атмосферные шумы максимальны.

Исходя из того факта, что границы зоны действия ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС, формируемые водными в её состав ККС, в большинстве случаев проходят вне крупных промышленных центров, при расчете будут учитываться только среднестатистические промышленные шумы в сельской местности. При этом уровень атмосферных шумов в ночное время и среднестатистических промышленных шумов в сельской местности можно

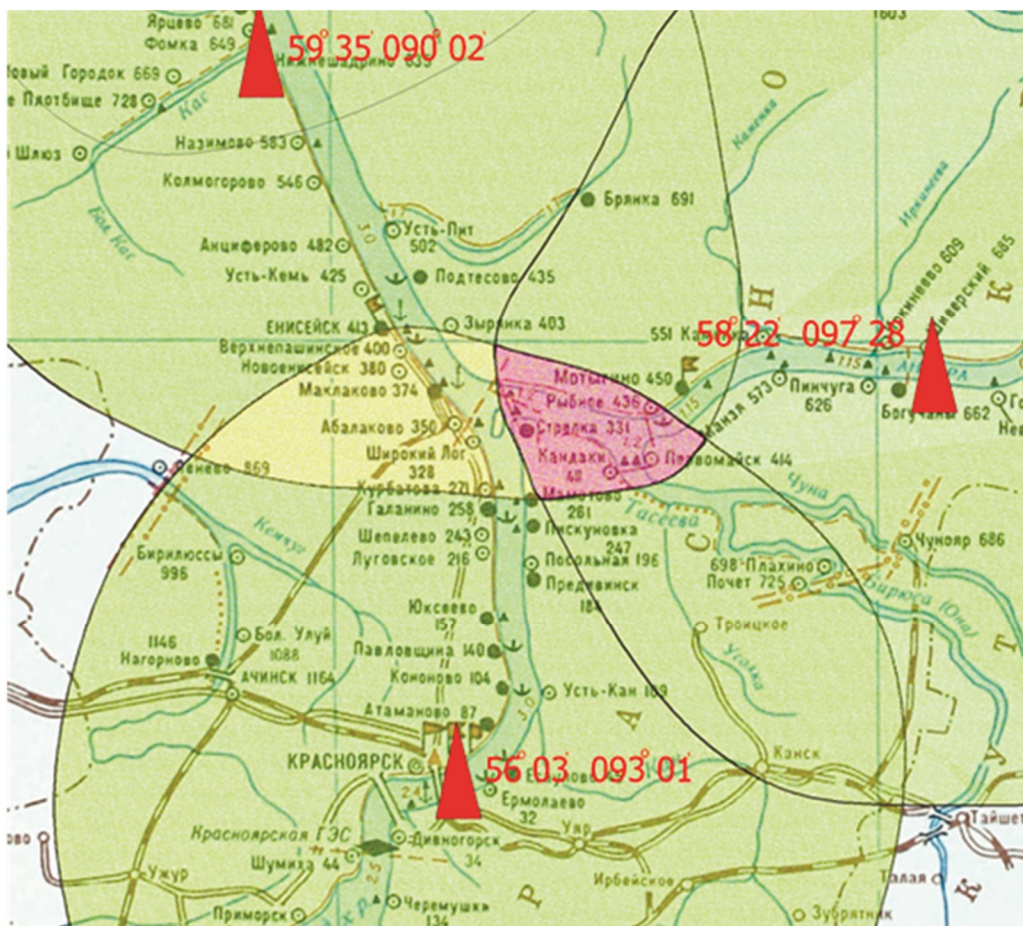


Рис. 2. Зоны действия ККС на наиболее проблемном участке в бассейне Енисея

определить по данным многочисленных исследований, представленным на рис. 1.

Учитывая постоянство спектральной плотности шумовой помехи в достаточно узкой полосе полезного сигнала, в выражении для энергетики сигнала можно перейти от отношения мощностей к отношению напряженностей, что существенно упрощает расчеты и избавляет от необходимости привязываться к конкретным параметрам антенн и приемников.

Таким образом, преобразования выражений (2) и (9), а также исключение выражений (4), (7), (10) и (11) позволят существенно упростить алгоритм расчета дальности действия ККС при построении оптимальной топологии сети контрольно-корректирующих станций.

Литература

1. Бродский Е.Л. Инфокоммуникация управления и мониторинга транспортного процесса на внутренних водных путях Европы / Е.Л. Бродский, А.А. Сикарев. Труды МАС. 2005. № 4 (35). С. 21-27.
2. Каретников В.В. Применение глобальных навигационных спутниковых систем на внутренних водных путях Российской Федерации: монография / В.В. Каретников, С.Ф. Миляков, С.Ф. Шахнов. СПб.: Наука, 2021. 287 с.
3. Постановление Правительства РФ от 03.03.2012 №189 «О федеральной целевой программе «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы».
4. Шахнов С.Ф. Особенности учета влияния подстилающей поверхности в радиоканалах речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS / С.Ф. Шахнов, И.А. Сикарев, Г.А. Киселевич. Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2015. № 1. С. 83-87.
5. Шахнов С.Ф. Расчет функции ослабления поля контрольно-корректирующих станций с учетом влияния подстилающей поверхности

/ С.Ф. Шахнов. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2015. № 1 (29). С. 116-123. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-116-123

6. Сикарев А. А. Оптимальный прием дискретных сообщений: монография / А.А. Сикарев, А.И. Фалько. М.: Связь, 1978. 328 с.

7. 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 адм. С.О. Макарова. 2014. № 6 (28). С. 24-30.

8. Karetnikov V.V. Construction Method of Telecommunication System for Corrective Information Distribution / V.V. Karetnikov, S.F. Shahnov, A.A. Ageeva. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018, vol. 171, is. 1, pp. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012010

9. Сикарев А. А. К расчету напряженности поля в радиоканалах речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS среднего волнового диапазона / А.А. Сикарев, С.Ф. Шахнов. Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адм. С.О. Макарова. 2014. № 3 (25). С. 27-31.

10. Иванова А.А. Оценка влияния промышленных помех при построении системы контроля и управления речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС / GPS / А.А. Иванова, С.Ф. Шахнов, А.А. Буцанец. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 509-518. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-509-518.

11. Рекомендация МСЭ-R P.372-13 (09/2016). Радишум. Серия Р: Распространение радиоволн. Международный союз электросвязи, 2016. 76 с.

12. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель Д.Р.Ж. Уайт, Джермантаун, Мерилэнд, 1971-1973. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Сокращ. пер. с англ. Под ред. А.И. Сапира. Послесловие и комментарии А.Д. Князева. М.: «Сов. радио», 1977. 352 с.

13. Violette J.L.N. Electromagnetic compatibility handbook / J.L.N. Violette, D.R.J. White, M.F. Violette. Springer, 2014. 718 p.