Построение оптимальной структуры цепи базовых станций автоматической идентификационной системы для акваторий внутренних водных путей на основе вычисления энтропии

В. В. Каретников, А. В. Васин

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
Российская Федерация, 198035, Санкт-Петербург, Двинская, 5/7

Для цитирования: Каретников В. В., Васин А. В. Построение оптимальной структуры цепи базовых станций автоматической идентификационной системы для акваторий внутренних водных путей на основе вычисления энтропии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. Т. 14. Вып. 2. С. 151–157. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2018.207>

Исследуется задача построения сплошной зоны действия для полноценного функционирования инфокоммуникационных систем на внутренних водных путях Российской Федерации. Рассматривается конструктивный подход на основе вычисления энтропии для построения квазиоптимальной цепи базовых станций автоматических идентификационных систем (АИС), соединенных в цепь. Данный класс АИС в настоящее время представляется как наиболее перспективный для крупномасштабного внедрения на внутренних водных путях Российской Федерации.

Ключевые слова: внутренние водные пути, энтропия множества, автоматическая идентификационная система, взаимная помеха, безопасность судоходства, загрожающий рельеф, зона действия базовой станции АИС.

1. Введение. В настоящее время внутренние водные пути Российской Федерации (ВВП РФ) играют важную роль в обеспечении транспортного процесса, при транспортировке различных видов грузов и пассажиров. Достаточно условно ВВП РФ с учетом специфики реализации грузовых и пассажирских перевозок можно разделить на магистральные и местные водные пути. Первые используются для обеспечения международных перевозок и перевозок между крупными районами РФ, последние — для обслуживания внутренних связей. В настоящее время судоходные ВВП РФ условно разделяются на 15 бассейнов, общей протяженностью чуть менее 102 тыс. км, причем 16.7 тыс. км относятся к искусственным водным путям. В результате РФ по протяженности ВВП занимает второе место в мире, уступая только Китаю. Так, например, протяженность ВВП Германии составляет около 7500 км, Франции — 8500 км, Финляндии — 7800 км. Особое место среди ВВП РФ занимает единая глубоководная система европейской части (ЕГС ЕЧ) протяженностью 6500 км, создание которой было завершено в 1975 г. (рис. 1). Формирование ЕГС ЕЧ ВВП РФ стало возможным после ввода в эксплуатацию Волго-Балтийского, Волго-Донского, Беломорско-Балтийского каналов и канала имени Москвы. В настоящее время для обеспечения безопасности судоходства, мониторинга и управления транспортным процессом на ВВП РФ применяется весьма широкий спектр современных инфокоммуникационных технологий в сочетании с технологией высокоточного местоопределения. Таким образом, весьма конструктивным решением указанной комплексной проблемы представляется внедрение инфокоммуникационных триад, строящихся по иерархическому принципу типа: «корпоративная речная информационная система (КРИС) — речная

Рис. 1. Единая глубоководная система внутренних водных путей РФ

информационная служба (РИС) — автоматизированная система управления движением судов (АСУ ДС)» [1]. Здесь нужно отметить инфокоммуникационную систему первого иерархического уровня АСУ ДС. Данный класс в настоящее время пред-

ставляется как наиболее перспективный для крупномасштабного внедрения на ВВП РФ, причем автоматическая идентификационная система (АИС) является одним из отраслевых сегментов АСУ ДС. Таким образом, для полноценного функционирования подобных инфокоммуникационных систем на ВВП РФ необходимо сформировать сплошную зону действия путем достаточного перекрытия рабочих зон действия базовых станций (БС) АИС, соединенных в цепь [1].

2. Методика решения. Данная задача может быть решена путем математического моделирования рабочей зоны БС АИС при применении «статистической модели АИС». В случае необходимости учета заграждающего рельефа в зависимости от закона распределения можно воспользоваться одной из представленных ниже моделей.

Равномерный закон распределения $W(H)$ заграждающего рельефа H получим, если воспользуемся очевидным наблюдением, что величины заграждающего рельефа находятся между максимальным и минимальным допустимыми значениями $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$:

$$W(H) = \frac{1}{H_{\max} - H_{\min}}.$$

В некоторых случаях следует использовать показательный закон распределения, тогда

$$W(H) = \alpha e^{-\alpha H},$$

где α — параметр распределения высот заграждающего рельефа, выбирается в пределах от 0.01 до 0.1. Данный коэффициент характеризует заданную вероятность приема.

В случае, когда заграждающий рельеф может быть аппроксимирован нормальным законом распределения,

$$W(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_H^2}} \exp\left(-\frac{H - m_H}{2\sigma_H^2}\right),$$

здесь m_H и σ_H^2 — математическое ожидание и дисперсия распределения заграждающего рельефа соответственно. Кроме того, стоит отметить, что для большей части участков ЕГС ЕЧ ВВП РФ в основном характерен показательный закон распределения.

При определении дальности действия БС АИС на ЕГС ЕЧ ВВП РФ необходимо учитывать относительное перемещение судового транспондера АИС. Такую задачу принято решать с учетом равномерного или случайного закона распределения. В зависимости от начальных условий при решении такой задачи можно использовать статистическую модель Максвелла или Рэлея.

На основе модели Максвелла для плотности распределения случайной величины, характеризующей дальность приема R , получим

$$W(R) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{R^2}{\sigma^3} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где среднее квадратичное отклонение σ определяется из соотношения $\sigma^2 = \frac{\pi}{8R^2}$.

Применив модель Рэлея для плотности распределения случайной величины, характеризующей дальность приема R , находим

$$W(R) = \frac{R^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

причем $\sigma^2 = \frac{2R^2}{\pi}$. Заметим, что модель Максвелла (формула (1)) является жесткой и в основном используется для оценки радиуса действия сверху. Модель Рэля (2) более мягкая и позволяет проводить оценку радиуса действия снизу.

Наконец, при наличии равномерного распределения получим

$$W(R) = \frac{1}{R_{\max} - R_{\min}}.$$

В последнем случае снова учитываем, что случайная величина R , характеризующая дальность приема, заключена между минимальным и максимальным допустимыми значениями $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$.

С помощью комплекса приведенных моделей (см. формулы (1), (2)) в зависимости от начальных условий достаточно просто можно определить дальность действия БС АИС на ЕГС ЕЧ РФ (рис. 2).

Рис. 2. Зоны действия БС АИС

Рассмотренный участок условно можно разделить на три части. К первой относится нижняя часть Чебоксарского водохранилища и отрезок р. Волги между этим и Куйбышевским водохранилищами до опорного пункта Камское Устье. Здесь установлены три БС АИС, расположенные в опорных пунктах Звенигово, Вязовые и Казань. В данном случае зоны действия БС АИС перекрываются достаточным образом. Во второй части рассматриваемой акватории имеются две БС АИС, размещенные в опорных пунктах Чистополь и Соколка. Причем зоны их действия надежно перекрываются. Заключительная часть обеспечена семью БС АИС, которые были установлены в опорных пунктах Камское Устье, Старая Майна, Ульяновск, Белый Яр, Тольятти, Самара и Октябрьск. В этом случае имеет место недостаточное перекры-

тие зон действия БС АИС, обусловленное в определенной степени неоптимальным их количеством и расположением.

Для того чтобы получить оптимальное количество и расположение в терминах r -энтропии [2] покрытия, определим r -разделенное множество $E = \{x_i\}_{i=1, \dots, N}$ точек, описывающих места установки БС АИС, причем $\text{dist}(x, y) > r$. Параметр r является определяющим в количественных оценках зон перекрытия. Поэтому необходимо учитывать также плотность указанного множества, т. е. любая точка акватории бассейна должна располагаться на удалении от ближайшей БС АИС не более чем на r . Тогда получим, что если $x, y \in E$, то $\text{dist}(x, y) < 2r$. Кроме того, акватория бассейна G покрыта кругами радиуса r , характеризующими зоны действия БС АИС:

$$G = \bigcup_{i=1}^N B(x_i, r).$$

В таком случае количество БС АИС будет определяться r -энтропией плоской области, представляющей исследуемую акваторию:

$$H_r = \log N(r, G),$$

где $N(r, G)$ — число точек, образующих r -разделенное множество. Кроме того, рассчитаем верхнюю и нижнюю размерности исследуемой области по формулам

$$M \dim G = - \limsup_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r, G)}{\log r} \quad (3)$$

и

$$m \dim G = - \liminf_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r, G)}{\log r}. \quad (4)$$

Если $M \dim G = m \dim G$, то данная величина называется размерностью Минковского.

3. Заключение. Приведенные соотношения (3), (4) при $r \rightarrow 0$ моделируют явление коллапса зоны действия БС АИС в случае влияния на полезный сигнал сосредоточенной по спектру помехи [1]. Для решения задачи в данной постановке используемый параметр энтропии H_r принимает во внимание только загромождающий рельеф и перемещение судового транспондера АИС относительно БС АИС. Для нас существенным является следующее положение: требуется так устанавливать БС станции, чтобы полученное r -разделенное множество дополнительно удовлетворяло критерию r -плотности, которое при оценке размеров перекрытия зон действия соседних БС АИС цепи позволяет минимизировать такое перекрытие. В результате связь между квазимаксимальной и квазимиимальной оценками перекрытия зон действия цепи БС АИС будет установлена таким образом:

$$N(r, G) \leq M(r, G) \leq N(r/2, G).$$

Рассмотрим случай, когда некоторая аппроксимируемая область ВВП представляет собой прямолинейный участок, например канал длины I . Минимальное количество кругов радиуса r , покрывающих прямолинейный участок, оценивается как $N(r, I) \approx I/r$, поэтому для энтропии получим

$$\log N(r, I) \approx \log \frac{I}{r}.$$

В реальности структура ВВП весьма неоднородна. В таком случае решение

задачи квазиоптимального распределения БС АИС цепи для формирования сплошной зоны действия может быть получено, как в п. 2. Однако в этом случае необходимо учитывать фрактальность исследуемого бассейна, когда прямолинейные участки такого бассейна соизмеримы с размерами зоны действия БС АИС. Авторы планируют в будущем выполнить такую задачу и получить количественные результаты для оценок энтропии зоны действия БС АИС конкретных бассейнов ВВП на основе полученных распределений дальностей действия отдельных БС АИС.

Литература

1. Каретников В. В., Сикарев А. А. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях. Изд. 2. СПб.: ГУМРФ, 2013. 525 с.

2. Falconer K. L. The geometry of fractal sets. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 162 p.

Статья рекомендована к печати проф. Л. А. Петросяном.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2017 г.; принята к печати 15 марта 2018 г.

Контактная информация:

Каретников Владимир Владимирович — докт. техн. наук, профессор;
spguwc-karetnikov@yandex.ru

Васин Андрей Васильевич — докт. техн. наук, профессор; andrejvasin@gmail.com

The entropy approach construction of the optimal structure of the chain of the automated identification systems basic stations for inland waterways

V. V. Karetnikov, A. V. Vasin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
5/7, Dvinskaya ul., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

For citation: Karetnikov V. V., Vasin A. V. The entropy approach construction of the optimal structure of the chain of the automated identification systems basic stations for inland waterways. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 151–157. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2018.207>

The article deals with a constructive approach based on the entropy for constructing a quasi-optimal chain of automated identification systems (AIS) base stations on the inland waterways. The inland waterways of Russian Federation play an important role in providing the transport process while transporting various types of cargo and passengers. Here is a special way, it is worth noting the info-communication system of the first hierarchical level of the vessel control system. This class of AIS is the most promising for large-scale implementation of the inland waterways of Russian Federation. For the full-fledged operation of such info-communication systems on the inland waterways of Russian Federation, it is necessary to form a continuous information field, formed by sufficient overlapping of the working zones of the operation of AIS base stations connected in a chain. To estimate the optimal number of AIS base stations, we consider inland waterways as a fractal set. Therefore, it is convenient to estimate the number of stations forming a continuous coverage zone in terms of the Hausdorff measure. The problem is to find the minimal quantity of elements of the r -network for different r . This number is calculated by means of r -entropy H_r of the set under consideration. The entropy approach allows us to take into account the phenomenon of collapse of AIS base station coverage zone in case of interference with a useful signal of a spectrum-centered noise. This case corresponds to the entropy H of the set (the limit of H_r when r tends to 0).

Keywords: inland waterways, entropy of a set, automatic identification system, interference, safety of navigation, relief, coverage area of AIS base station.

References

1. Karetnikov V. V., Sikarev A. A. *Topologia differentsial'nyh polei i dal'nost' deistvia kontrol'no-korrektiruyuschih stantsiy vysokotochnogo mestoopredelenia na vnutrennih vodnyh putiah* [Topology of differential fields and range of control-correcting stations for high-precision positioning on inland waterways]. Ed. 2. Saint Petersburg, GUMRF Publ., 2013, 525 p. (In Russian)
2. Falconer K.L. *The geometry of fractal sets*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985, 162 p.

Author's Information:

Karetnikov Vladimir V. — Dr. Sci. in technics, professor; spguwc-karetnikov@yandex.ru

Vasin Andrei V. — Dr. Sci. in technics, professor; andrejvasin@gmail.com