

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-380-389

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE POTENTIAL INFORMATIVE CAPACITY OF COASTAL AND SHIP RADAR STATIONS

N. T. Nichiporenko, B. N. Sivachenko

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

Comparative analysis of the potential information capacity ashore and aboard ships radar stations.

The wide application of radar stations as information sensors in the navigation safety system poses the task of optimally matching the received information from the radar (radar) with the channels of transmission, processing and storage of information in digital computers and specialized digital processor systems Processing and display, which necessitates a quantitative assessment of the information capacity of radars.

Similar problems must be solved when translating information from posts to the center of ship traffic control systems (VTS), when creating documentation devices, etc. To evaluate the potential informative capacity of each radar, the choice of methods from the information theory available in the theory for quantitative evaluation is justified. At the stage of detection and reception of signals, structural and statistical methods for estimating the amount of information are justified. At the stage of processing, transformation, mapping and registration of signals, estimates of the amount of information based on Kolmogorov's method are justified. When determining the influence of the received information for the consumer on obtaining the final result, it is proposed to apply semantic methods for estimating the amount of information. Formulas for calculating the potential information capacity of radars, taking into account their technical parameters and operational characteristics, are obtained and quantitative results are presented in Table 1. These data confirm that ship and shore stations with the best resolution in range and angle have the ability to extract from Surrounding environment more information. The analysis showed that the radar with probing pulses at higher frequencies have better accuracy characteristics and greater potential information Other things being equal.

Comparative analysis showed that with a minimum pulse length, the potential information capacity of radars is proportional to the frequency to the power of 11/4, i.e. Increases with a decrease in the wavelength of the probe pulse, approximately proportional to f^3 . The potential informativity of radars in the millimeter wave band (K-band) is an order of magnitude higher than in the centimeter band (X-band) and three orders of magnitude higher than the radar of the decimeter band (S-band), etc. The quantitative estimate of the potential informativity Different ship and coastal radars makes it possible to carry out their optimal choice for solving specific radar problems.

Keywords: radar station, coastal and ship radar, potential informativeness of the radar, the amount of information, the pulse width, the milimeter range (K-band), the centimeter range (X-band), the decimeter range (S-band), the comparative analysis, the potential information content of the various radars.

For citation:

Nichiporenko, Nikolay T., and Boris N. Sivachenko. "Comparative analysis of the potential informative capacity of coastal and ship radar stations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 380–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-380-389.

УДК 621.396

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ БЕРЕГОВЫХ И СУДОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Н. Т. Ничипоренко, Б. Н. Сиваченко

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

Широкое применение радиолокационных станций в качестве датчиков информации в системах обеспечения безопасности судоходства ставит задачу оптимального согласования получаемой информации

от радиолокационной станции (РЛС) с каналами передачи, обработки и хранения информации в цифровых вычислительных машинах и специализированных цифровых процессорах систем обработки и отображения, что вызывает необходимость количественной оценки информационной емкости радаров.

Аналогичные задачи необходимо решать при трансляции информации из постов в центр систем управления движением судов (СУДС), при создании устройств документирования и др. Для оценки потенциальной информативной ёмкости каждого радара обоснован выбор методов из существующих в теории информации для количественной её оценки. На этапе обнаружения и приёма сигналов обоснованы структурный и статистический методы оценки количества информации. На этапе обработки, преобразования, отображения и регистрации сигналов обоснованы оценки количества информации по методике Колмогорова. При определении влияния принятой информации для потребителя на получение конечного результата предлагается применять семантические методы оценки количества информации. Получены формулы для вычисления потенциальной информационной ёмкости радиолокаторов с учётом их технических параметров и эксплуатационных характеристик, а также представлены количественные результаты. Полученные данные свидетельствуют о том, что судовые и береговые станции с лучшим разрешением по дальности и углу позволяют извлечь из окружающей обстановки большее количество информации. Анализ показал, что РЛС с зондирующими импульсами на более высоких частотах имеют лучшие точностные характеристики и большую потенциальную информативную ёмкость при прочих равных условиях.

Сравнительный анализ показал, что при минимальной длительности импульса потенциальная информационная ёмкость радаров пропорциональна частоте в степени $11/4$, т. е. возрастает при уменьшении длины волны зондирующего импульса примерно пропорционально f^3 . Потенциальная информативность радиолокаторов миллиметрового диапазона волн на порядок-два выше сантиметрового диапазона и на три порядка выше, чем радары дециметрового диапазона и др. Полученная количественная оценка потенциальной информативности разных судовых и береговых радаров позволяет осуществлять их оптимальный выбор для решения конкретных задач радиолокации.

Ключевые слова: радиолокационная станция, береговая и судовая РЛС, потенциальная информативность РЛС, количество информации, длительность импульса, миллиметровый диапазон, сантиметровый диапазон, дециметровый диапазон, сравнительный анализ, потенциальная информативность различных РЛС.

Для цитирования:

Ничипоренко Н. Т. Сравнительный анализ потенциальной информационной ёмкости береговых и судовых радиолокационных станций / Н. Т. Ничипоренко, Б. Н. Сиваченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 380–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-380-389.

Введение

Широкое применение радиолокационных станций в качестве датчиков информации в системах обеспечения безопасности судовождения ставит задачу оптимального согласования получаемой информации от радиолокационных станций (РЛС) с каналами передачи, обработки и хранения информации в цифровых вычислительных машинах и специализированных цифровых процессорах систем обработки и отображения, что вызывает необходимость количественной оценки информационной емкости береговых и судовых РЛС. При использовании удалённых постов в системах управления движением судов (СУДС) на протяженных фарватерах важной проблемой является обеспечение трансляции радиолокационной информации по каналам связи в единый диспетчерский центр. Понятно, что можно создать оптимальные системы передачи при количественной оценке передаваемой информации от каждого поста УДС. Подобная проблема возникает также при создании канала передачи радиолокационной информации с экранов постов УДС непосредственно на суда, находящиеся в зоне их обслуживания с целью повышения надежности проводки. Оптимальное документирование данных в виде радиолокационного изображения о процессе управления судами на акваториях портов при проводке по каналам и фарватерам, особенно в случае возникновения аварий и аварийных случаев, важно и необходимо.

Решение указанных и других задач является затруднительным без количественной оценки информативности судовых и береговых РЛС различных диапазонов. Под потенциальной информативностью $S_{\text{п}}$ судовых и береговых РЛС будем понимать максимально количество информации, которое может выдать (извлечь) РЛС с учетом ее эксплуатационных характеристик и технических

параметров в условиях свободного пространства (без учета влияния различных метеорологических факторов, подстилающей поверхности, влияния оконечного устройства отображения информации и шумов).

Радиолокация включает в себя ряд различных процессов: генерацию СВЧ-сигналов и создание методов зондирования пространства, обнаружение отражённых сигналов и оптимальная обработка, оценку параметров положения и движения объектов, обработку информации с помощью ЭВМ и процессоров, отображение информации в оконечных устройствах. При этом необходим разный подход к количественной информативной оценке этих процессов. Краткий обзор основных теоретико-информативных представлений позволяет выбрать наиболее адекватный исследуемым процессам метод количественной оценки информации.

В теории информации существуют следующие направления: структурное, статистическое, семантическое и по Колмогорову [1]. *Структурная теория* рассматривает дискретное строение массивов информации [2], [3]. Количественная оценка определяется путем подсчета количества элементов, связей между ними или комбинаций из них. *Статистическая теория* использует вероятностный подход к определению количества информации [4]. Информация рассматривается как сообщение об исходе случайных событий, реализация случайных величин и функций. Количество информации ставится в зависимость от соотношения вероятностей данного события после поступления информации и до ее получения. Статистическая теория оперирует понятием энтропии как меры неопределенности, учитывающей информативность сообщений. *Семантическая теория* информации, определяемая содержанием и смыслом информации, учитывает целесообразность, ценность и полезность информации [5]. Понятие *ценность информации* связано с влиянием, которое оказывает полученная информация на успешность осуществления цели, ради достижения которой эта информация получается и перерабатывается.

В работе [6] предложен более общий подход к оценке суммарного (предельного) количества информации как суммы количества информации по дальности, скорости, азимуту и углу места. Рассмотрим более детально сущность этих направлений. В работах [9] и [10] словосочетаниям «цифровые информационные потоки» и «сравнительная оценка информативности судовой РЛС / САРП в режимах радиолокационного измерения и Overlay» не даётся необходимая количественная оценка информации.

Основная часть

В структурной теории различают геометрическую, комбинаторную и аддитивную меры информации.

Геометрический метод измерения количества информации заключается в определении длины, площади или объема геометрической модели информационного канала в количестве дискретных единиц (квантов).

Пусть сообщение занимает объем по координатным осям x , y , z . Если дискретные отсчеты по осям соответствуют интервалам Δx , Δy , Δz , то количество информационных квантов по осям составляет:

$$n_x = \frac{x}{\Delta x}; n_y = \frac{y}{\Delta y}; n_z = \frac{z}{\Delta z}. \quad (1)$$

Тогда количество информационных квантов в полном объеме

$$N = n_x n_y n_z. \quad (2)$$

Количество информации при применении комбинаторной меры вычисляется как количество комбинаций элементов с учетом разнообразия их связей и позиций. Этот метод нашел широкое применение при кодировании информации в системах передачи информации.

Статистические меры информации учитывают вероятностную зависимость наступления различных событий и оперирует статистическим множеством. Согласно мере Шеннона, при ве-

роятностном подходе информация рассматривается как сообщение об исходе случайных событий. Из теорем 10 и 16 [4] вытекает основное соотношение статистической теории информации:

$$J(x) = H(x) - H\left(\frac{x}{x_y}\right), \quad (3)$$

где $J(x)$ — количество передаваемой информации по каналу связи при наличии помех;

$H(x)$ — энтропия передаваемого сообщения;

$H\left(\frac{x}{x_y}\right)$ — энтропия шума, условная энтропия.

Используя выражение (3), определим количество информации:

$$J_{\text{РЛС}} = H_{\text{апр}} - H_{\text{апост}} \quad (4)$$

Здесь $H_{\text{апр}}$ — энтропия информации о наличии цели в зоне обзора РЛС до обнаружения (априорная информация);

$H_{\text{апост}}$ — энтропия информации после радиолокационного наблюдения (апостериорная информация);

$$H_{\text{апр}} = -\int_D \int_{\varphi} P(D, \varphi) \cdot \log_2 P(D, \varphi) \cdot dD \cdot d\varphi, \quad (5)$$

где $P(D, \varphi)$ — плотность распределения вероятности появления целей в зоне обзора РЛС;

$$H_{\text{апост}} = -\int_D \int_{\varphi} P(\delta D, \delta \varphi) \cdot \log_2 P(\delta D, \delta \varphi) \cdot d(\delta D) \cdot d(\delta \varphi), \quad (6)$$

где $P(\delta D, \delta \varphi)$ — плотность вероятностей распределения погрешностей измерения дальности и азимутального положения целей.

Использование в качестве информационного критерия количества информации при независимости следующих друг за другом измерений дает статистическую оценку. Динамическую характеристику системы можно оценить с учетом скорости передачи информации:

$$R_{\lim} = \frac{J}{T}. \quad (7)$$

Наибольшая скорость передачи информации характеризует пропускную способность радиолокационного канала за время одного обзора:

$$C = R_{\max} = \frac{J}{T_{\text{обз}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{обз}}$ — время одного обзора пространства.

Количественная мера Шеннона абстрагирует от смыслового содержания информации. Это позволяет получать обобщенные характеристики по загрузке каналов при передаче радиолокационной информации, каналов преобразования информации цифровой вычислительной машине, оценке объема памяти и т. д.

Шенноновская теория информации рассматривает только неотрицательные величины энтропий и количество информации, поэтому не может описать важный случай поступления дезинформации. Колмогоровская мера информации [8] уточняет понятие энтропии и количества информации без привлечения теоретико-вероятностного подхода применительно к индивидуальным объектам, а не к множеству объектов и явлений.

Построение меры Колмогорова основано на таких фундаментальных понятиях, как алгоритм, вычислимая функция, машина Тьюринга и др. А. Н. Колмогоровым показано, что

$$J(x, y) = H(x) - H\left(\frac{x}{y}\right), \quad (9)$$

где $J(x, y)$ — количество информации в индивидуальном объекте y относительно индивидуального объекта x ;

$H(x)$ — алгоритмическая энтропия объекта x ;

$H\left(\frac{x}{y}\right)$ — условная алгоритмическая энтропия.

Кроме того, показано, что $J(x; x) \approx H(x)$, т. е. количество информации, необходимой для восстановления данного объекта x , совпадает с его алгоритмической энтропией. Количество информации определяется как минимальная длина программы (сложность), позволяющая однозначно преобразовывать один объект в другой. Сложность программы определяется степенью различия объектов. Чем большая степень различия объектов, тем больше требуется команд при реализации программы для преобразования одного объекта в другой.

Предложенный А. Н. Колмогоровым алгоритмический подход к построению информационной меры открывает новые возможности, определяя количество информации в одном индивидуальном объекте относительно другого. Применительно к радиолокационным системам этот метод оценки информативности необходимо и целесообразно использовать при оценке отображения вторичной информации на экранах РЛС и САРП. Речь идет о том, что с помощью процессоров вычисляются определенные величины, которые должны однозначно и детерминировано представляться на экранах и дисплеях.

В различных областях науки и техники, включая радиолокацию, необходимо учитывать также ценность информации, что характерно для семантической меры информации [5]. Под потенциальной информативностью РЛС будем понимать максимальное количество информации, которое может выдать (извлечь) РЛС с учетом ее эксплуатационных характеристик и технических параметров в условиях свободного пространства (без учета влияния различных метеофакторов, подстилающей поверхности, влияния конечного устройства отображения информации и шумов). Исходя из выбранной ранее структурной оценки, количество информации соответствует количеству пространственных ячеек и определяется по формуле

$$n = N_D N_\varphi = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{\Delta D_0} \cdot \frac{\varphi}{\Delta \varphi_0}, \quad (10)$$

где D_{\max}, D_{\min} — соответственно максимальная и минимальная дальность обнаружения;

φ — угол обзора РЛС в горизонтальной плоскости;

$\Delta D_0, \Delta \varphi_0$ — разрешение РЛС по дальности и углу соответственно.

Так как $D_{\max} \gg D_{\min}$, можно с некоторым приближением принять, что $D_{\max} - D_{\min} \approx D_{\max}$.

В случае аппроксимации диаграммы направленности антенны (ДНА) гауссовой кривой имеем

$$\Delta \varphi = 0,7\alpha, \quad (11)$$

где α — ширина ДНА в горизонтальной плоскости.

Количество дискретных элементов n , наблюдаемых при круговом обзоре, определяется выражением

$$n = \frac{D_{\max}}{\Delta D_0} \cdot \frac{2\pi}{\Delta \varphi} = \frac{D_{\max}}{\frac{c\tau}{2}} \cdot \frac{2\pi \cdot 57,3^\circ}{0,7\alpha}, \quad (12)$$

где $\Delta D_0 = \frac{c\tau}{2}$ — потенциальное разрешение РЛС по дальности;

c — скорость распространения радиоволн;

τ — длительность зондирующего импульса и $\Delta D_0 = 150 \tau_{\text{мкс}}$.

$$n = 3,43 \frac{D_{\max}}{\tau\alpha}. \quad (13)$$

В окончательных устройствах судовых РЛС фиксируется одно из двух условий: в данной ячейке пространства имеется или отсутствует отраженный сигнал от цели, т. е. сумма условий обнаружения $m = 2$. Общее количество возможных комбинаций всего множества состояний равно m^n .

Количество информации равно энтропии исходного множества:

$$J = \log_2 m^n = n, \quad (14)$$

т. е. при бинарном обнаружении количество информации в идеальном случае не превосходит число элементарных ячеек пространства в зоне обзора.

Динамическую оценку количества информации РЛС можно получить с учетом скорости передачи информации. Согласно выражениям (10) и (11), наибольшая скорость передачи информации характеризует пропускную способность радиолокационной системы:

$$C_n = \frac{J}{T_a}, \quad (15)$$

где $T_a = \frac{60}{N}$ — время одного оборота антенны;

N — скорость вращения антенны (об/мин), $N = 20$.

Подставив в выражение (15) значения из выражений (13) и (14), получим

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 1,14 \frac{D_{\text{max}}}{\tau \alpha}. \quad (16)$$

Для условий свободного пространства максимальную дальность судовой РЛС можно определить из основного уравнения радиолокации [7]:

$$D_{\text{max}} = \left(\frac{P_n \sigma \lambda^2 \eta^2 G^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пр min}}} \right)^{1/4}, \quad (17)$$

где D_{max} — максимальная дальность обнаружения объекта с эффективной поверхностью рассеивания в свободном пространстве;

P_n — импульсная мощность СВЧ-генератора;

G — КПД антенного устройства;

λ — длина волны зондирующего импульса;

η — КПД антенно-волноводного тракта;

σ — эффективная поверхность рассеивания объекта;

$P_{\text{пр min}}$ — минимальная чувствительность приемника.

Преобразуем выражение (17) с учетом значения G :

$$G = \frac{4\pi}{\alpha\theta} = \frac{4\pi(57,3)^2}{\alpha\theta}, \quad (18)$$

где θ, α — ширина ДНА, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскости в град.

С учетом выражения (18) формула (17) запишется в виде

$$D_{\text{max}} = \left(\frac{P_n \eta^2}{P_{\text{пр min}}} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\lambda \cdot 4\pi(57,3)^2}{\alpha\theta} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\sigma}{(4\pi)^3} \right)^{1/4}. \quad (19)$$

Подставив полученное значение в выражение (16), после преобразования получим

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 34,3 \left(P_n \eta^2 \right)^{1/4} P_{\text{пр min}}^{-1/4} \lambda^{1/2} \alpha^{-3/2} \theta^{-1/2} \tau^{-1} \sigma^{1/4}. \quad (20)$$

Формула (20) позволяет определить потенциальную информационную емкость РЛС через ее технические параметры и эксплуатационные характеристики, а также эффективную поверхность рассеивания объекта. Потенциальная информативная емкость судовой РЛС является ее важной

комплексной характеристикой. Она показывает технический уровень системы с точки зрения способности РЛС выдать (извлечь) максимальное количество информации об окружающей обстановке.

Выражение (20) позволяет получить непосредственную связь информационной емкости с ее точностными характеристиками. Чем короче длительность импульса τ и уже диаграмма направленности РЛС в горизонтальной и вертикальной плоскости, тем больше потенциальная информационная емкость РЛС и выше точность измерений.

Представляет интерес получение зависимости между потенциальной информативностью РЛС и такими важнейшими точностными характеристиками, как среднеквадратичные потенциальные погрешности измерения дальности δ_{D_n} и углового положения δ_{φ_n} . Известно, что величины δ_{φ_n} и δ_{D_n} связаны с разрешающей способностью по дальности ΔD_0 и шириной диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости следующими соотношениями [7]:

$$\delta_{\varphi_n} = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi q}}; \quad \delta_{D_n} = \frac{c\tau}{2\sqrt{\pi q}}, \quad (21)$$

где $q = \frac{P_c}{P_{ш}}$ — отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе приемного устройства.

Преобразовав выражение (20) с учетом (21), получим

$$C_n = \frac{17,2}{\delta_{D_n} (\delta_{\varphi_n})^{3/2}} \cdot \left(\frac{P_u \eta^2}{P_{np \min}} \right)^{1/4} \cdot \lambda^{3/2} \theta^{-1/2} f \sigma^{-1/4}. \quad (22)$$

Сравнивая РЛС одного диапазона, можно определить, что радар, у которого потенциальная информативность больше, имеет лучшие точностные характеристики при прочих равных параметрах. Из выражения (22) также следует, что РЛС с зондирующими импульсами на более высоких частотах имеют лучшие точностные характеристики и большую потенциальную информативную емкость. На этих частотах существует техническая возможность создания лучшей разрешающей способности по углу и дальности. Естественно, представляет большой практический интерес оценка и сравнение потенциальной информационной емкости существующих отечественных и зарубежных судовых РЛС, приведенных в следующей таблице.

Анализ потенциальной емкости береговых и судовых РЛС

Технические параметры	«Балтика-Б»	«Нева-Б»	МР-2ПВ	JRC (JMA (922-6XA)	Океан-М	Океан-М	Наяда-5	Орион-М
Длина волны, см	0,9	0,9	0,9	3,2	3,2	10	3,2	0,815
Шкала, мили	0,125-24	0,125-24	0,125-24	0,125-96	0,5/4/8/16/32/64	0,5/4/8/16/32/64	0,5/4/8/16/32/64	0,125-32
N , об/мин	10/20	10/20	10/20	26	16	16	16	16
P_n , кВт	12	15	12	25	50	50	20	50
$P_{np \min}$, Вт	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-11}$
η	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
θ , град	20	20	20	20	20	20	20	20
α , град	0,35	0,23	0,4	1,2	0,7	2,3	0,7	0,25
δ , м ²	155140	155140	155140	12265	12265	1256	12265	189188
τ_n , мкс	0,05/0,25/0,6	0,03/0,2/0,6	0,05/0,2/0,6	0,07/0,1/15/0,2/0,3/0,6/1,2	0,11/0,2/0,4/0,8	0,1/0,2/0,4/0,8	0,25/0,7	0,05
$C_{п.дв.ед.}$ бит/с	$44,7 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^9$	$4,9 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^7$	$6,5 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^9$
	$91,4 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^9$	$9,6 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^8$	$3,4 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^8$	—
	$32,1 \cdot 10^9$	$6,9 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^7$	—	—
	—	—	—	$1,7 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^8$	$8,4 \cdot 10^6$	—	—

Анализ потенциальной емкости существующих судовых РЛС по результатам, представленным в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

– потенциальная информативность конкретной РЛС зависит от длительности импульсов $\tau_{\text{и}}$ и при прочих равных условиях. Например, потенциальная емкость РЛС «Нева-Б» миллиметрового диапазона изменяется от значения $C_{\text{и}} = 1,4 \cdot 10^{10}$ дв. ед. при $\tau_{\text{и}} = 0,03$ мкс до $C_{\text{и}} = 6,9 \cdot 10^8$ дв. ед. при $\tau_{\text{и}} = 0,6$ мкс;

– потенциальная информативность РЛС-миллиметрового диапазона волн на один-два порядка выше сантиметрового диапазона и на три порядка выше, чем РЛС-дециметрового диапазона.

Полученные выражения (20) и (22) не позволяют непосредственно получить потенциальную информационную емкость РЛС в зависимости от частоты, так как длина волны в явном или неявном виде входит в целый ряд параметров. Для того чтобы получить такую возможность, выполним дальнейшие преобразования.

Известно, что $P_{\text{пр min}}$ определяется согласно выражению

$$P_{\text{пр min}} = KT_0 N_{\text{ш}} m \Delta f, \quad (23)$$

где K — постоянная Больцмана, $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \left(\frac{Д}{К} \right)$;

T_0 — температура антенны, которую принимают равной 290 К [$KT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт · с];

$N_{\text{ш}}$ — коэффициент шума приемного устройства;

m — коэффициент различимости (для судовых РЛС $m = 3$);

Δf — полоса пропускания приемного устройства.

Для РЛС с прямоугольной формой зондирующего импульса

$$\Delta f = \frac{1 \dots 1,37}{\tau_{\text{и}}}. \quad (24)$$

С учетом выражений (23) и (24) формула (20) примет следующий вид:

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 34,3 (P_{\text{и}} \eta^2)^{\frac{1}{4}} \cdot (KT_0 N_{\text{ш}} m)^{-1/4} \lambda^{1/2} \tau_{\text{и}}^{-3/4} \sigma^{1/4} \alpha^{-3/2} \Theta^{-1/2}. \quad (25)$$

Из уравнения (25) следует, что для получения максимального количества информации при заданной длине волны длительность генерируемого импульса необходимо выбирать как можно короче. Для СВЧ-источников импульсных колебаний существует зависимость [5]

$$\lambda = \frac{C}{Q} \tau, \quad (26)$$

где Q — добротность колебательной системы.

Следовательно, между длиной волны и минимальной длительностью зондирующего импульса существует прямо пропорциональная зависимость:

$$\tau_{\text{min}} = Qf^{-1}, \quad Q = 10^{-1} - 10^{-4} \text{ (для магнетронов)}. \quad (27)$$

Подставив значения выражений (26) и (27) в формулу (25) после преобразования получим

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 34,3 (P_{\text{и}} \eta^2)^{1/4} \cdot (KT_0 N_{\text{ш}} m)^{-1/4} \alpha^{-3/2} \theta^{-1/2} \sigma^{1/4} Q^{-3/4} C^{1/2} f^{1/4}. \quad (28)$$

Для зеркальной антенны между размерами симметрично усеченного параболического рефлектора и шириной ДНА в вертикальной и горизонтальной плоскости существуют зависимости вида

$$\alpha = 68,8 \frac{\lambda}{d_{\text{r}}} \theta = 68,8 \frac{\lambda}{d_{\text{в}}}, \quad (29)$$

где d_r, d_b — соответственно горизонтальные и вертикальные размеры усеченного параболоида вращения.

Кроме того, если предположить, что в качестве цели используется металлическая пластина $S = 1 \text{ м}^2$, ЭПР которой определяется из выражения [7]:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}, \quad (30)$$

то, подставив выражения (29), (30) в (28), получим

$$C_{\text{п.дв.сд}} = 6,04 \cdot 10^{-18} (P_i \eta^2)^{\frac{1}{4}} d_r^{\frac{3}{2}} d_b^{\frac{1}{2}} f^{\frac{11}{4}} (N_{\text{ш}} \cdot m)^{\frac{1}{4}}. \quad (31)$$

Из выражения (31) можно сделать следующий вывод: при принятых ограничениях информативность судовой РЛС с зеркальной антенной при фиксированных размерах d_r, d_b и минимальной длительности импульса пропорциональна частоте в степени 11/4, т. е. возрастает при уменьшении длины волны зондирующего импульса примерно пропорционально f^3 .

Если в выражении (31) задаться реально реализуемыми значениями параметрами РЛС в используемых диапазонах радиоволн, то это позволит получить количественные значения потенциальной информативности соответствующих радаров для сравнения их между собой. Физически это объясняется тем, что при допустимых размерах антенных систем и технически реализуемой минимальной длительности импульса с увеличением частоты улучшается разрешающая способность по углу и дальности, т. е. возрастает подробность наблюдаемой обстановки. В процессе обзора пространства судовая РЛС с помощью зондирующего объема считывает информацию об окружающей обстановке. Чем меньше разрешаемый объем (площадка), тем большая подробность получаемой информации и выше помехозащищенность от гидрометеоров. Данную закономерность уместно сравнить с работой передающей телевизионной трубки: чем меньше диаметр считывающего луча трубки, тем больше подробность и четкость передаваемой телевизионной информации.

Выводы

1. Для оценки потенциальной информативной ёмкости каждого радара обоснован выбор методов из существующих в теории информации для количественной её оценки.
2. Получены формулы для вычисления потенциальной информационной ёмкости радиолокаторов с учётом их технических параметров и эксплуатационных характеристик и количественные результаты расчёта.
3. Сравнительный анализ показал, что при минимальной длительности импульса потенциальная информационная ёмкость радаров пропорциональна частоте в степени 11/4, т. е. она возрастает при уменьшении длины волны зондирующего импульса примерно пропорционально f^3 .
4. Полученная количественная оценка потенциальной информативности разных судовых и береговых радаров позволяет осуществлять их оптимальный выбор для решения конкретных задач эффективности и безопасности судовождения для морского и речного флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ничипоренко Н. Т. Теория, разработка и внедрение комплекса радиолокационных средств миллиметрового диапазона с целью повышения безопасности мореплавания: дис. ... д - ра техн. наук: 05.22.16 «Судовождение» / Н. Т. Ничипоренко. — Л.: ЛВИМУ, 1991. — 332 с.
2. Дулевич В. Е. Информационные свойства радиолокационных систем / В. Е. Дулевич. — Л.: ЛВИКА, 1970. — 301 с.
3. Сколник М. Справочник по радиолокации: в 4 т. / М. Сколник; под общ. ред. К. Н. Трофимова. — М.: Сов. Радио, 1976. — Т. 1. Основы. — 435 с.
4. Шеннон К. Математическая теория связи / К. Шеннон // Работы по теории связи и кибернетики; под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. — М.: ИЛ, 1964. — 829 с.

5. Хартли В. Л. Передача информации. Теория информации и её приложение / В. Л. Хартли; под ред. А. А. Харкевича. — М.: Физматгиз, 1959. — 342.
6. Быстров Р. П. Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой / Р. П. Быстров, А. А. Потапов, А. В. Соколов. — М.: Радиотехника, 2005. — 367 с.
7. Байрашевский А. М. Судовые радиолокационные системы / А. М. Байрашевский, Н. Т. Ничипоренко. — М.: Транспорт, 1982. — 317 с.
8. Колмогоров А. Н. Три подхода к понятию количества информации / А. Н. Колмогоров // Проблемы передачи информации. — 1965. — Т. 1. — № 1. — С. 3–11.
9. Маринич А. Н. Цифровые информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и системах связи / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 48–56.
10. Маринич А. Н. Сравнительная оценка информативности судовой РЛС/САРП в режимах радиолокационного измерения и overlay с использованием данных АИС-целей / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 21–23.

REFERENCES

1. Nichiporenko, N. T. Teoriya, razrabotka i vnedrenie kompleksa radiolokatsionnykh sredstv millimetrovogo diapazona s tsel'yu povysheniya bezopasnosti moreplavaniya. Dr. diss. L.: LVIMU, 1991.
2. Dulevich, V. E. *Informatsionnye svoystva radiolokatsionnykh sistem*. L.: LVKA, 1970.
3. Skolnik, M. *Spravochnik po radiolokatsii*. Edited by K.N. Trofimov. M.: Sov. Radio, 1976. Vol. 1. Osnovy.
4. Shannon, K. "Matematicheskaya teoriya svyazi." *Raboty po teorii svyazi i ki-bernetiki*. M.: IL, 1964.
5. Khartli, V. L. *Peredacha informatsii. Teoriya informatsii i ee prilozhenie*. Edited by A. A. Kharkevich. M.: Fizmatgiz, 1959.
6. Bystrov, R. P., A. A. Potapov, and A. V. Sokolov. *Millimetrovaya radiolokatsiya s fraktal'noi obrabotkoi*. M.: Radiotekhnika, 2005.
7. Bairashevskii, A. M., and N. T. Nichiporenko. *Sudovye radiolokatsionnye sistemy*. M.: Transport, 1982.
8. Kolmogorov, A. N. "Tri podkhoda k ponyatiyu kolichestva informatsii." *Problemy peredachi informatsii* 1.1 (1965): 3–11.
9. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. "Digital information streams in the ship integrated systems of navigation and communication systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 48–56.
10. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, Yu. M. Ustinov, and A. R. Shigabutdinov. "Comparative estimation of information provided by RADAR/ARPA in the modes of the radio-location measuring and OVERLAY with the use of these AIS-targets." *Eksploatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 21–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ничипоренко Николай Тимофеевич — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: fkt_pt@gumrf.ru

Сиваченко Борис Николаевич — кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: sbnl@mail.ru, fkt_pt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nichiporenko, Nikolay T. — 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: fkt_pt@gumrf.ru

Sivachenko, Boris N. — PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sbnl@mail.ru, fkt_pt@gumrf.ru

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