

УДК 621.391.26

А. А. Дятко¹, С. М. Костромицкий², П. Н. Шумский²¹Белорусский государственный технологический университет²РНПЦ «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»**РАСЧЕТ МОЩНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА,
ОТРАЖЕННОГО ОТ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
ПРИ НАЛИЧИИ НАДВОДНЫХ СУДОВ**

В статье представлен метод вычисления мощности радиолокационного сигнала, отраженного от морской поверхности, при наличии надводных судов. Отмечено, что особенностью модели радиолокационного сигнала, отраженного от морской поверхности, является то, что в диаграмму направленности антенны (ДНА) радиолокационной станции (РЛС) могут попадать крупногабаритные суда. Наличие таких судов приводит к образованию участков морской поверхности, недоступных для электромагнитной волны, излученной антенной РЛС, – участков тени. Это в свою очередь вызывает уменьшение мощности отраженного от поверхности сигнала, что должно быть учтено при построении модели сигнала. В работе показано, что затенение морской поверхности при расчете мощности отраженного сигнала может быть учтено путем вычитания площади затененной части поверхности из общей площади, которая попадает в ДНА радиолокационного комплекса. Вводится понятие коэффициента коррекции как отношение площади затененного судном участка морской поверхности к общей площади поверхности, попадающей в ДНА радиолокационного комплекса. Показано, что площадь морской поверхности, которая должна быть использована при вычислении мощности отраженного сигнала, может быть найдена с использованием коэффициента коррекции для каждой элементарной площадки, на которые разбивается вся отражающая сигнал площадь морской поверхности.

Ключевые слова: модель радиолокационного сигнала, диаграмма направленности антенны.

A. A. Dyatko¹, S. M. Kostromitskiy², P. N. Shumskiy²¹Belarusian State Technological University²RSPC “Center of the Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”**CALCULATION OF POWER OF RADIOLOCATION SIGNAL,
REFLECTED FROM MARINE SURFACE, IN THE PRESENCE
OF SURFACE VESSELS**

The method of calculation of power of the radiolocation signal reflected from marine surface in the presence of surface vessels is presented in the article. It is marked that the feature of model of the radiolocation signal reflected from a marine surface is that in the diagram of orientation of aerial RLS the ships of largenesses can get. The presence of such courts results in formation of areas of marine surface, inaccessible for the hertzian wave radiated by aerial RLS – areas of shade. It causes the reduction of power of the signal reflected from the surface in turn, that it must be taken into account at the construction of the model of signal. It is shown that shading of marine surface at the calculation of power of the reflected signal can be taken into account by deduction of area of the shaded part of surface from the general area, that gets in the diagram of orientation of aerial of radiolocation complex. The concept of correction coefficient is introduced as the ratio of the area of the shaded portion of the sea surface to the total surface area getting into the diagram of orientation of the ariel of the radiolocation complex. It shows that the area of the sea surface which showed be used in calculating the power of the reflected signal can be calculated with the use of the correction coefficient for each elementary area to which all the sea surface reflecting the signal is broken.

Key words: model of radiolocation signal, diagram of orientation of aerial.

Введение. Как отмечалось в работах [1, 2], в настоящее время все большее распространение получает использование аппаратно-программных комплексов для испытаний радиолокационных систем различного назначения. В этом случае совокупность управляющих сигналов, требуемых для анализа работы системы, вырабаты-

вается с помощью специальных имитаторов, основанных на ЭВМ [3]. Такой подход обеспечивает воспроизводимость условий испытаний и значительно уменьшает затраты на их проведение. В связи с этим важное значение приобретает разработка математических моделей [4] сигналов, имеющих место для тех или иных условий

функционирования радиолокационной системы, и алгоритмов для их реализации на ЭВМ. В частности, одной из задач, возникающей при моделировании радиолокационных сигналов, является задача построения математической модели сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. В качестве такой поверхности может выступать поверхность суши или моря. На некотором этапе построения данной модели возникает задача расчета мощности сигнала, отраженного от некоторого элементарного участка поверхности. При этом особенностью модели для морской поверхности является то, что в диаграмму направленности антенны (ДНА) РЛС могут попадать крупногабаритные суда, которые будут создавать участки морской поверхности, недоступные для электромагнитной волны, излученной антенной РЛС, – участки тени. Это в свою очередь приведет к уменьшению мощности отраженного от поверхности сигнала, что должно быть учтено при построении модели.

Целью данной работы является расчет мощности радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности, при наличии затенений, обусловленных наличием надводных судов.

Основная часть. Как показано в [1, 2], модель входного сигнала антенны РЛС, отраженного от подстилающей поверхности, может быть представлена как сумма сигналов, отраженных от некоторого числа элементарных участков, составляющих эту поверхность:

$$s(t) = e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \sum_{i=0}^{N-1} A_i(t) U(t - \tau_E^i), \quad (1)$$

где ω_0 – частота зондирующего сигнала РЛС; φ_0 – начальная фаза зондирующего сигнала РЛС; $A_i(t)$ – амплитуда сигнала, отраженного от i -го участка поверхности; $U(t)$ – закон модуляции зондирующего сигнала; τ_E^i – задержка сигнала на входе антенны РЛС при отражении от i -го участка поверхности по отношению к моменту посылки зондирующего импульса;

$$D_i = M \left\{ |A_i(t)|^2 \right\} = \frac{H_A^2 P_0 S_A G_A p_i}{16\pi^2 r_i^6} r_i \Delta\Theta_\beta \Delta r \alpha_0^S = \frac{H_A^2 P_0 S_A G_A p_i}{16\pi^2 r_i^6} \Delta S_i \alpha_0^S - \quad (2)$$

мощность сигнала, отраженного от i -го участка поверхности; $\Delta S_i = r_i \Delta\Theta_\beta \Delta r$ – площадь i -го участка поверхности;

$$r_i = R_{\min} + \frac{\Delta r}{2} + i\Delta r - \quad (3)$$

горизонтальная дальность до центра i -го участка поверхности; Δr – протяженность элементарного участка поверхности по радиальной дальности; H_A – высота антенны; P_0 – мощность зондирующего сигнала; S_A – эффективная площадь раскрыва приемной антенны; G_A – коэффициент усиления антенны РЛС; p_i – коэффициент (случайное число из $[0, 1]$), статистически моделирующий колебания значения площади видимой части (со стороны антенны РЛС) i -го участка поверхности в результате волнение моря; α_0^S – среднее значение удельной эффективной площади рассеивания (ЭПР) элемента морской поверхности.

Пусть L_{sh} – длина надводного судна, D_{sh} – ширина надводного судна, H_{sh} – средняя высота надводного судна, β_{sh}^L – азимут продольной оси судна (может совпадать с азимутом скорости судна при его движении), \vec{e}_{sh}^β – единичный вектор вдоль направления азимута судна β_{sh} (азимута центра масс), \vec{e}_{sh}^L – единичный вектор, направленный вдоль продольной оси судна. Будем рассматривать судно как параллелепипед длиной L_{sh} , шириной D_{sh} и высотой H_{sh} , ориентированный относительно своего азимута под углом $\Delta\beta_{sh}$, где $\Delta\beta_{sh}$ – угол между векторами \vec{e}_{sh}^β и \vec{e}_{sh}^L (рис. 1):

$$\Delta\beta_{sh} = \beta_{sh}^L - \beta_{sh}. \quad (4)$$

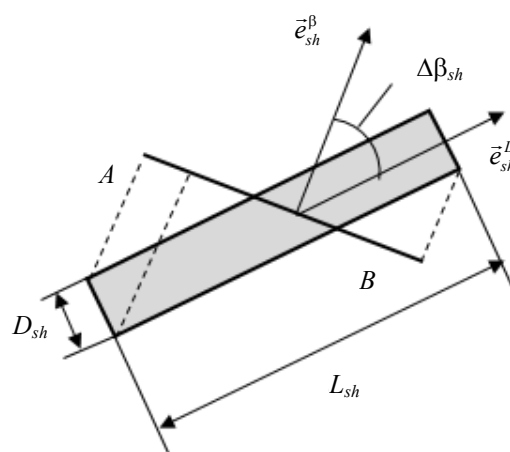


Рис. 1. Условное изображение морского судна

Очевидно, что степень затенения водной поверхности судном будет зависеть от его ориентации относительно РЛС и определяться длиной отрезка $AB = L_{sh}^L$ – размером судна, видимого со стороны антенны РЛС (рис. 1):

$$L_{sh}^\perp = L_{sh} \left| \sin(\beta_{sh}^L - \beta_{sh}) \right| + D_{sh} \left| \cos(\beta_{sh}^L - \beta_{sh}) \right|. \quad (5)$$

Пусть R_{sh} – горизонтальная дальность до судна, тогда

$$\delta\beta_{sh} = 2 \arctg \frac{L_{sh}^\perp}{2R_{sh}} \quad (6)$$

угловой размер судна.

Если оказывается, что

$$\delta\beta_{sh} \ll \Delta\Theta_\beta, \quad (7)$$

где $\Delta\Theta_\beta$ – ширина ДНА РЛС по азимуту, то рассматривать затенение не имеет смысла. В противном случае вычислим длину ΔR_{sh} затененного участка морской поверхности.

Составим пропорцию (рис. 2):

$$\frac{\Delta R_{sh}}{R_{sh} + \Delta R_{sh}} = \frac{H_{sh}}{H_A}. \quad (8)$$

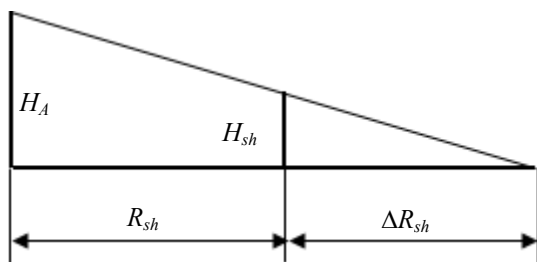


Рис. 2. Схема для расчета протяженности области затенения

Из (8) найдем выражение для определения протяженности зоны затенения:

$$\Delta R_{sh} = \frac{R_{sh}}{H_A/H_{sh} - 1}. \quad (9)$$

Полученное выражение имеет смысл при $H_A > H_{sh}$. При этом область тени определяется фигурой $BCDE$ (рис. 3). При $H_A \leq H_{sh}$ будем полагать, что

$$\Delta R_{sh} = R_{max} - R_{sh}, \quad (10)$$

где R_{max} – максимальная дальность, с которой собирается отраженный от морской поверхности сигнал. В этом случае область затенения будет определяться фигурой $BCD'E'$ (рис. 3).

Вычислим площадь поверхности, с которой собирается отраженный от морской поверхности сигнал в отсутствии надводного судна:

$$\Delta S = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_0^{\Delta\Theta_\beta} r dr d\beta = \left(R_{min} + \frac{\Delta R}{2} \right) \Delta R \Delta\Theta_\beta, \quad (11)$$

где R_{min} – минимальная дальность, с которой собирается отраженный от морской поверхности сигнал ($\Delta R = R_{max} - R_{min}$).

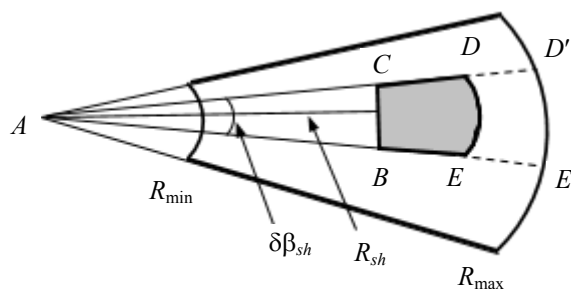


Рис. 3. Схема для вычисления площади тени

Найдем теперь площадь поверхности, затененной надводным судном:

$$\begin{aligned} \Delta S_{sh} &= \int_{R_{sh}}^{R_{sh} + \Delta R_{sh}} \int_0^{\delta\beta_{sh}} r dr d\beta = \\ &= \left(R_{sh} + \frac{\Delta R_{sh}}{2} \right) \Delta R_{sh} \delta\beta_{sh}. \end{aligned} \quad (12)$$

Определим площадь морской поверхности, формирующей отраженный сигнал, при наличии затенения части поверхности надводным судном:

$$\Delta S_x = \Delta S - \Delta S_{sh} = \Delta S(1 - ks), \quad (13)$$

где

$$ks = \frac{\Delta S_{sh}}{\Delta S} = \frac{\left(R_{sh} + \frac{\Delta R_{sh}}{2} \right) \Delta R_{sh} \delta\beta_{sh}}{\left(R_{min} + \frac{\Delta R}{2} \right) \Delta R \Delta\beta} \quad (14)$$

коэффициент затенения.

Представим область площадью ΔS как набор элементарных площадок ΔS_i :

$$\Delta S = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta S_i, \quad (15)$$

где N – число элементарных площадок.

Подставляя (15) в (13), получим:

$$\Delta S_x = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta S_i (1 - ks) = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta S'_i, \quad (16)$$

где

$$\Delta S'_i = \Delta S_i (1 - ks). \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что если морская поверхность, отражающая сигнал, представляется в виде набора элементарных площадок, то

при затенении участка поверхности надводным судном площадь элементарной площадочки следует скорректировать, используя коэффициент ks (14). Полученное значение $\Delta S'_i$ должно использоваться в (2) при вычислении значения мощности.

Заметим, что если в ДНА РЛС находятся несколько надводных судов, то полагая, что создаваемые ими области затенения не пересекаются, получим:

$$\begin{aligned} \Delta S_x &= \Delta S - \sum_{i=1}^M \Delta S_{sh}^i = \Delta S \left(1 - \sum_{i=1}^M \frac{\Delta S_{sh}^i}{\Delta S} \right) = \\ &= \Delta S \left(1 - \sum_{i=1}^M ks_i \right), \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$ks_i = \frac{\Delta S_{sh}^i}{\Delta S} \quad (19)$$

коэффициент затенения (14), который вычисляется для каждого надводного судна; M – число надводных судов.

Представляя область площадью ΔS как набор элементарных площадок (15), имеем:

$$\Delta S_x = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta S_i \left(1 - \sum_{j=1}^M ks_j \right) = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta S_i'' \quad (20)$$

где

$$\Delta S_i'' = \Delta S_i \left(1 - \sum_{j=1}^M ks_j \right). \quad (21)$$

Полученное значение $\Delta S_i''$ должно использоваться в (2) при определении значения мощности.

Заключение. В статье представлен метод вычисления мощности радиолокационного сигнала, отраженного от морской поверхности, при наличии надводных судов. Отмечено, что затенение морской поверхности при расчете мощности отраженного сигнала может быть учтено путем вычитания площади затененной части поверхности из общей площади, которая попадает в ДНА радиолокационного комплекса. Вводится понятие коэффициента коррекции как отношение площади затененного судном участка морской поверхности к общей площади поверхности, попадающей в диаграмму направленности антенны радиолокационного комплекса. Показано, что площадь морской поверхности, которая должна быть использована при вычислении мощности отраженного сигнала, может быть найдена с использованием коэффициента коррекции для каждой элементарной площадочки, на которые разбивается вся отражающая сигнал площадь морской поверхности.

Литература

1. Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Математическая модель сигнала, отраженного от земной поверхности, при сопровождении РЛС низколетящей цели // Доклады БГУИР. 2015. № 8. С. 17–23.
2. Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Математическая модель радиолокационного сигнала, отраженного от земной поверхности // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 127–130.
3. Кобайло А. С. Применение теории синтеза вычислительных систем реального времени для моделирования физических процессов на примере радиосигналов // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 135–137.
4. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2005. 320 с.

References

1. Dyatko A. A., Kostromitskiy S. M., Shumskiy P. N. Mathematical model of the signal reflected from the ground during radar accompanying low-flying targets. *Doklady BGUIR* [Papers of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2015, no. 8, pp. 17–23 (In Russian).
2. Dyatko A. A., Kostromitskiy S. M., Shumskiy P. N. Mathematical model of the radiolocation signal reflected from an earth surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 127–130 (In Russian).
3. Kobaylo A. S. Theory of computing systems for real-time simulation of physical processes on the example of radiosignals. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 135–137 (In Russian).
4. Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P. *Matematicheskoye modelirovaniye: Idei. Metody. Primery* [Mathematical modelling: Ideas. Methods. Examples]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 320 p.

Информация об авторах

Дятко Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Dyatko_A@tut.by

Костромицкий Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, директор РНПЦ «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси» (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15/5, Республика Беларусь). E-mail: sleus@mail.ru

Шумский Петр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе. РНПЦ «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси» (220072, г. Минск, ул. П. Бровки 15/5, Республика Беларусь). E-mail: Shumski_petr@open.by

Information about the authors

Dyatko Aleksandr Arkad'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Informatics and Web-design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Dyatko_A@tut.by

Kostromitskiy Sergey Mikhaylovich – DSc (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of RSPC “Center of the Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (15/5, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sleus@mail.ru

Shumskiy Petr Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Deputy Director for science. RSPC “Center of the Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (15/5, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Shumski_petr@open.by

Поступила 12.03.2016