

УДК 534.21

© С. В. Марасёв, А. И. Маюшин
 ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия
 aimashoshin@mail.ru

ОПТИМАЛЬНАЯ ЧАСТОТА РАБОТЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Статья поступила в редакцию 07.11.2015, после доработки 06.10.2016.

Оптимальная частота играет важную роль при проектировании и применении гидроакустических средств различного назначения. Для простоты расчет оптимальной частоты для конкретных гидроакустических средств принято выполнять с использованием упрощенных формул, не учитывающих особенности распространения сигналов и шумов моря в конкретном районе Мирового океана, что приводит к определенным ошибкам в выборе оптимальной частоты. Целью работы является исследование оптимальной частоты шумопеленгования и гидролокации с учетом всех влияющих факторов, в том числе частотной зависимости аномалии распространения сигнала и вертикальной анизотропии шумов моря. Проведенное исследование показало, что в реальном океаническом волноводе оптимальные частоты всегда ниже рассчитанных без учета частотной зависимости аномалии распространения акустического сигнала. Причем величина этого расхождения в результатах расчета зависит от гидроакустических условий в районе. Наибольшее расхождение имеет место в условиях положительной рефракции, когда акустическая энергия распространяется путем отражения от поверхности моря. В этих условиях на величину оптимальной частоты существенное влияние оказывает волнение поверхности моря: чем волнение больше, тем оптимальная частота ниже. Наибольшее влияние аномалии распространения сигнала наблюдается на дистанциях 3—30 км. Это объясняется тем, что на меньших дистанциях гидроакустические условия слабо влияют на распространение сигнала, а на больших дистанциях основное влияние на оптимальную частоту оказывает пространственное затухание сигнала.

Ключевые слова: шумопеленгование, гидролокация, реальный океанический волновод, оптимальная частота.

S. V. Marasev, A. I. Mashoshin
 JSC «Concern CSRI Elektropribor», Saint-Petersburg, Russia

SONAR OPTIMAL FREQUENCY IN THE REAL OCEAN CONDITIONS

Received 07.11.2015, in final form 06.10.2016.

The optimal frequency plays an important role in design and usage of different sonar both passive and active. For simplicity the optimal frequency calculation is usually fulfilled with the use of the formulas not taking in account the peculiarities of the signal and sea noise propagation in the concrete conditions. It can entail the mistakes in the optimal frequency choosing. The work is devoted to the passive and active sonar optimal frequency investigation. Investigations were fulfilled taking in account all the factors influencing on the optimal frequency, including signal propagation anomaly and vertical sea noise anisotropy. The investigation showed that in the real ocean conditions the optimal frequency always lower than simplified calculation gives. And the difference depends on the hydroacoustic conditions in the ocean region. The greatest difference takes place in the conditions of positive ray refraction when the propagation of the acoustic energy occurs by reflection of sea surface. In these conditions the optimal frequency value strongly depends on sea state — the greater sea state the lower optimal frequency. The greatest influence of signal propagation anomaly takes place on the distances from 3 to 30 km: on the smaller distances the conditions have weak influence on the signal propagation; on the larger distances the main influence on optimal frequency has spatial fading.

Key words: passive and active sonar, optimal frequency, hydroacoustic conditions.

Ссылка для цитирования: *Марасёв С. В., Маюшин А. И.* Оптимальная частота работы гидроакустических средств обнаружения в реальном океаническом волноводе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2016. Т. 9, № 4, С. 85—92.

For citation: *Marasev S. V., Mashoshin A. I.* Sonar optimal frequency in the real ocean conditions. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika.* 2016, 9, 4, 85—92.

Понятие «оптимальная частота» играет важную роль при проектировании и применении гидроакустических средств (ГАС) различного назначения [1—11].

Оптимальной частотой в гидроакустике принято называть частоту $f_{\text{opt}}(r)$, которой соответствует максимальное отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе линейной части приемного тракта (ЛЧПТ) ГАС на заданной дистанции r от источника излучения (отражения) сигнала [1—6].

Методика расчета оптимальной частоты была разработана в 1950—60-е гг. и изложена в большом количестве публикаций (например, [1]). Поскольку в те годы возможности вычислительной техники были весьма ограничены, для упрощения расчета оптимальной частоты при обосновании этой методики был сделан ряд допущений, в результате чего рассчитанная по ней оптимальная частота соответствует не реальному волноводу, а безграничной однородной среде с затуханием. Однако в целом ряде случаев расчет оптимальной частоты по упрощенной методике существенно отличается от строгого расчета, учитывающего распространение сигнала в реальном волноводе.

Далее будет показано, какие допущения были приняты при обосновании упрощенной методики. Начнем с режима шумопеленгования (ШП).

Известно [5], что соответствующее дистанции r ОСП (по мощности) на частоте f на выходе ЛЧПТ шумопеленгатора с учетом всех факторов вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{шп}}(f, r) = \frac{r_0^2 \cdot P_{\text{so}}^2(f) \cdot 10^{-0,1\beta(f)r-6}}{r^2 \cdot P_n^2(f)} \cdot A_{\text{шп}}(f, r) \cdot \kappa(f), \quad (1)$$

где $P_{\text{so}}^2(f)$ — частотная зависимость квадрата давления сигнала, приведенная к расстоянию $r_0 = 1$ м от источника, Па²; r — дистанция до источника, км; f — частота, кГц; $\beta(f)$ — частотная зависимость коэффициента пространственного затухания, дБ/км, определяемая в виде:

$$\beta(f) = a_\beta + b_\beta \cdot f^{c_\beta},$$

где $a_\beta, b_\beta, c_\beta$ — константы; $A_{\text{шп}}(f, r)$ — аномалия распространения сигнала применительно к режиму ШП, отн. ед. мощности; $P_n(f)$ — частотная зависимость давления суммарной шумовой помехи на входе антенны, Па; $\kappa(f)$ — частотная зависимость коэффициента помехоустойчивости антенны, отн. ед. мощности [12].

Поскольку правая часть формулы (1) является достаточно сложной функцией частоты, при разработке упрощенной методики ее преобразовали следующим образом:

— предположили, что квадраты давления сигнала в точке излучения и помехи на входе антенны имеют одинаковые частотные зависимости, т. е.

$$\frac{P_{\text{so}}^2(f)}{P_n^2(f)} = L,$$

где L — константа. Для звукового диапазона частот данное предположение в среднем справедливо;

— поскольку аномалия распространения сигнала сложным образом зависит от частоты, частотную зависимость аномалии проигнорировали:

$$A(f, r) = A(r);$$

— коэффициент помехоустойчивости антенны $\kappa(f)$ заменили на коэффициент концентрации $\gamma(f)$ (что справедливо только для изотропного поля помех) и последний аппроксимировали степенной зависимостью от частоты [12]:

$$\kappa(f) \approx \gamma(f) = \gamma_0 \cdot f^{n_\gamma}, \quad (2)$$

где γ_0, n_γ — коэффициенты, равные [12]:

— для многомерной (плоской, цилиндрической, сферической, конформной) антенны:

$$\gamma_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{c^2}; \quad n_\gamma = 2,$$

где S — проекция площади антенны в направлении визирования, м²; c — скорость звука, м/с;

— для одномерной (линейной) антенны:

$$\gamma_0 = \frac{2 \cdot L}{c}; \quad n_\gamma = 1,$$

где L — длина антенны, м.

С учетом этих допущений формула (1) принимает вид:

$$Q(f, r) = \left[\frac{L \cdot A(r) \cdot \gamma_0}{10^6 \cdot r^2} \right] \cdot \left[10^{-0,1\beta(f)r} \cdot f^{n_\gamma} \right]. \quad (3)$$

Поскольку первый множитель в формуле (3) выходного ОСП не зависит от частоты, то максимум функции $Q_{\text{ШП}}(f, r)$ (для фиксированного расстояния) будет иметь место при значении частоты, обращающем в ноль частную производную по частоте от второго множителя. После несложных преобразований имеем:

$$f_{\text{опт/ШП}}(r) = r^{-\frac{1}{c_\beta}} \cdot \left(\frac{n_\gamma}{0,23 \cdot b_\beta \cdot c_\beta} \right)^{\frac{1}{c_\beta}}. \quad (4)$$

Для многомерной антенны, учитывая, что для нее $n_\gamma = 2$, формула (4) принимает вид:

$$f_{\text{опт/ШПм}}(r) = r^{-\frac{1}{c_\beta}} \cdot \left(\frac{8,7}{b_\beta \cdot c_\beta} \right)^{\frac{1}{c_\beta}}. \quad (5)$$

Для одномерной (линейной) антенны при $n_\gamma = 1$:

$$f_{\text{опт/ШПл}}(r) = r^{-\frac{1}{c_\beta}} \cdot \left(\frac{6,52}{b_\beta \cdot c_\beta} \right)^{\frac{1}{c_\beta}}. \quad (6)$$

Перейдем к режиму моностатической гидролокации (т. е. при совмещенных в одной точке пространства излучающей и приемной антеннах). Для этого режима ОСП на выходе ЛЧПТ вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{ГЛ}}(f, r) = P_{\text{изл}}^2(f) \cdot R_{\text{экв}}^2(f) / 4 \cdot \frac{r_0^4 \cdot 10^{-0,2\beta(f)r-12}}{r^4 \cdot \left[\frac{P_i^2(f)}{\kappa(f)} + P_\delta^2(f) \right]} \cdot A_{\text{ГЛ}}(f, r) \cdot P_{\text{изл}}^2(f) \cdot \frac{1}{4} R_{\text{экв}}(f) \cdot \frac{r_0^4 \cdot 10^{-0,2\beta(f)r-12}}{r^4 \cdot \left[\frac{P_i^2(f)}{\kappa(f)} + P_\delta^2(f) \right]}, \quad (7)$$

где $P_{\text{изл}}(f)$, $R_{\text{экв}}(f)$, $P_p(f)$, $A_{\text{ГЛ}}(f, r)$ — частотные зависимости соответственно давления излучаемого сигнала, приведенного к расстоянию $r_0 = 1$ м от излучающей антенны, Па, эквивалентного радиуса цели, м, давления реверберационной помехи, приведенной ко входу приемной антенны, Па, аномалии распространения сигнала от излучающей антенны до цели и обратно. Остальные обозначения аналогичны формуле (1).

При разработке упрощенной методики формула (7) была преобразована следующим образом:

— была предположена независимость от частоты $P_{\text{изл}}(f)$, $R_{\text{экв}}(f)$, $A_{\text{ГЛ}}(f, r)$:

$$P_{\text{изл}}(f) = P_{\text{изл}}, R_{\text{экв}}(f) = R_{\text{экв}}, A_{\text{ГЛ}}(f, r) = A_{\text{ГЛ}}(r);$$

— была предположена малость уровня реверберационной помехи по сравнению с уровнем шумовой помехи, т. е.

$$P_p^2(f) \ll \frac{P_n^2(f)}{\kappa(f)};$$

— коэффициент помехоустойчивости антенны $\kappa(f)$ заменен коэффициентом концентрации $\gamma(f)$ и аппроксимирован степенной зависимостью от частоты (2);

— спектр шумовой помехи аппроксимирован степенной зависимостью вида

$$P_n(f) = \frac{P_{n_0} \cdot f_0}{f},$$

где P_{n_0} — давление помехи, приведенное к частоте $f_0 = 1$ кГц, полосе 1 Гц и ко входу антенны, Па/√Гц.

С учетом приведенных допущений и упрощений формула (7) приобрела вид:

$$Q_{\text{ГЛ}}(f, r) = [P_{\text{изл}}^2 \cdot \frac{1}{4} R_{\text{экв}} \cdot A_{\text{ГЛ}}(r)] \cdot \frac{\gamma_0}{10^{12} \cdot P_{i_0}^2 \cdot r^4} \cdot \left[10^{-0,2\beta(f)r} \cdot f^{n_\gamma+2} \right]. \quad (8)$$

Поскольку первый множитель в (8) не зависит от частоты, то максимум ОСП имеет место при значении частоты, обращающем в ноль частную производную по частоте от второго множителя. После несложных преобразований получим:

$$f_{\text{опт/ГЛ}}(r) = \left[\frac{n_\gamma + 2}{0,46 \cdot b_\beta \cdot c_\beta \cdot r} \right]^{\frac{1}{c_\beta}} \quad (9)$$

Для многомерной антенны (при $n_\gamma = 2$) формула (9) принимает вид:

$$f_{\text{опт/ГЛм}}(r) = r^{-\frac{1}{c_\beta}} \cdot \left(\frac{8,7}{b_\beta \cdot c_\beta} \right)^{\frac{1}{c_\beta}} \quad (10)$$

Для линейной антенны (при $n_\gamma = 1$) имеем:

$$f_{\text{опт/ГЛл}}(r) = r^{-\frac{1}{c_\beta}} \cdot \left(\frac{6,52}{b_\beta \cdot c_\beta} \right)^{\frac{1}{c_\beta}} \quad (11)$$

Сравнение формул (5) и (6), полученных для режима ШП, с формулами (10) и (11), соответствующими режиму ГЛ, показывает, что при принятых упрощающих допущениях формулы (5) и (10) полностью совпадают, а формулы (6) и (11) отличаются значением одной константы.

Однако следует заметить, что такой результат получен в предположении независимости от частоты уровня сигнала, излучаемого в режиме ГЛ, что при увеличении частоты достигается уменьшением электрической мощности (при использовании одной и той же излучающей антенны) либо уменьшением размера излучающей антенны (при одной и той же электрической мощности). Если предположить неизменность размеров излучающей антенны и постоянство электрической мощности излучения, потребуется учитывать частотную зависимость коэффициента концентрации излучающей антенны и результат будет иным.

Зависимости (5), (6), (11) при $b_\beta = 0,0263$ и $c_\beta = 1,45$ в графическом виде приведены на рис. 1.

Вместе с тем известно [13, 14], что в реальных океанических волноводах оптимальные частоты, как правило, ниже, чем дают формулы (5), (6) и (11), что обусловлено, главным образом, частотной зависимостью аномалии распространения сигнала, которая с ростом частоты, как правило, уменьшается.

Целью работы является исследование оптимальных частот шумопеленгования и гидролокации в реальных океанических волноводах.

Методика исследования. Исследование проводилось по следующей методике.

Для заданных типов гидроакустических условий (ГАУ) с заданным шагом по дистанции с использованием сертифицированной лучевой программы, соответствующей слоисто-неоднородной модели среды с выровненным дном, рассчитывалась зависимость от частоты ОСП на выходе ЛЧПТ шумопеленгатора и гидролокатора. Расчет осуществлялся по формулам:

$$Q_{\text{ШП}}(f, r) = L_{\text{ШП}} \cdot 10^{-0,1\beta(f)r} \cdot \kappa(f) \cdot \sum_{j=1}^N A_j(f, r) \cdot H_{\text{пр}}(f, \psi_j, \psi_{\text{пр}});$$

$$Q_{\text{ГЛ}}(f, r) = L_{\text{ГЛ}} \cdot 10^{-0,2\beta(f)r} \cdot \kappa(f) \cdot f^{-nP_{\text{ШП}}} \cdot \sum_{j=1}^N \{A_j(f, r) \cdot H_{\text{изл}}(f, \psi_j, \psi_{\text{изл}})\} \times$$

$$\times \sum_{j=1}^N [A_j(f, r) \cdot H_{\text{пр}}(f, \psi_j, \psi_{\text{изл}}) \cdot \text{sign}(T_s/2 - |2T_{\text{max}} - (T_i + T_j)|)], \quad (12)$$

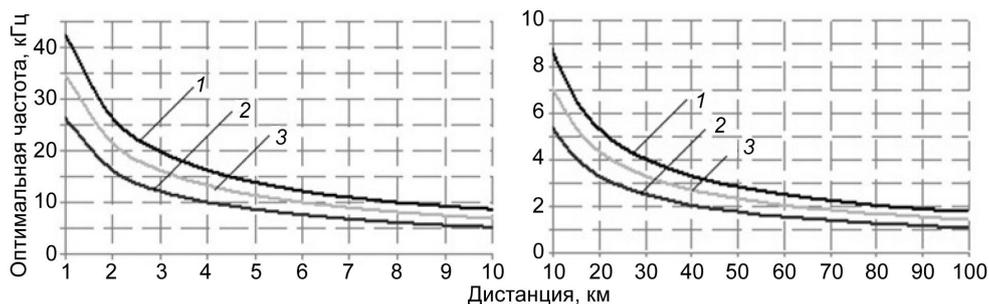


Рис. 1. Зависимости оптимальной частоты от дистанции с учетом упрощающих допущений

при $b_\beta = 0,0263$, $c_\beta = 1,45$.

1 — режимы ШП и ГЛ при использовании двухмерных антенн; 2 — режим ШП при использовании линейной антенны; 3 — режим ГЛ при использовании линейной антенны. Диапазон дистанций: слева — 1—10 км, справа — 10—100 км.

где $L_{\text{ШП}}, L_{\text{ГЛ}}$ — частотно независимые множители; $N_{\text{л}}$ — количество лучей, связывающих источник и приемник; $A_j(f, r)$ — аномалия распространения сигнала по j -му лучу; $H_{\text{пр}}(f, \psi_j, \psi_{\text{пр}})$ — характеристика направленности (ХН) приемной антенны в ВП; ψ_j — угол в ВП прихода j -го луча на приемную антенну; $\psi_{\text{пр}}$ — угол в ВП компенсации приемной антенны; $H_{\text{изл}}(f, \psi_i, \psi_{\text{изл}})$ — ХН излучающей антенны в вертикальной плоскости (ВП); ψ_i — угол в ВП выхода i -го луча из излучающей антенны; $\psi_{\text{изл}}$ — угол в ВП компенсации излучающей антенны; T_s — длительность зондирующего сигнала; T_i — время распространения сигнала по i -му лучу; T_{max} — время распространения максимального сигнала, т.е. сигнала, имеющего максимальную мощность на выходе ХН приемной антенны; $\text{sign}(x)$ — знаковая функция:

$$\text{sign}(x) = 1, \text{ если } x > 0; \text{sign}(x) = 0, \text{ если } x \leq 0.$$

Последний множитель в формуле (12) означает, что суммируются только те эхосигналы, распространяющиеся по разным лучам, которые приходят на приемную антенну в интервале $\pm T_s/2$ от момента времени прихода максимального сигнала.

Расчет осуществлялся для каждой заданной комбинации глубин погружения источника (отражателя) и приемника и каждой заданной комбинации углов компенсации в вертикальной плоскости излучающей и приемной антенн.

В каждой из рассчитанных зависимостей $Q_{\text{ШП}}(f, r)$ и $Q_{\text{ГЛ}}(f, r)$ для каждой дистанции и каждой m -й комбинации глубин и углов компенсации определялись абсцисса f_m и ордината Q_m ее максимума. Затем из всех ординат Q_m выбиралась максимальная и соответствующая ей абсцисса f_m принималась за оптимальную частоту для данной дистанции, которая наносилась в виде точки на график.

Расчет для обоих режимов осуществлялся для гидроакустических условий одного из районов мелкого моря в зимний период года и для одного из районов глубокого моря в зимний и летний периоды года. Вертикальное распределение скорости звука для названных условий изображено на рис. 2. Волнение моря в зимний период принималось равным 4 баллам, в летний период — 3 баллам. Частотная зависимость пространственного затухания описывалась коэффициентами $a_{\beta} = 0.00165$, $b_{\beta} = 0.0263$, $c_{\beta} = 1.45$. Расчеты осуществлялись для 100 комбинаций глубин источника и приемника в интервале глубин 30—150 м в мелком море и 30—300 м в глубоком море.

Рассматривались два типа антенн: планарная антенна с высотой 3 м (для 13 углов компенсации антенны в вертикальной плоскости в интервале $-15^{\circ} - +15^{\circ}$) и горизонтально расположенная линейная антенна.

Результаты исследования. Результаты расчетов приведены на рис. 3—7. Рис. 3, 4 соответствуют режиму ШП, рис. 5, 6 — режиму ГЛ. На рис. 3 и 5 изображены кривые для планарной антенны, рис. 4, 6 — для линейной антенны. По оси абсцисс на всех рисунках отложена дистанция до объекта, по оси ординат — оптимальная частота. Графики, обозначенные цифрой 1, соответствуют реальному волноводу, графики, обозначенные цифрой 2, посчитаны без учета частотной зависимости аномалии и при использовании коэффициента концентрации вместо коэффициента помехоустойчивости. В левой колонке на всех рисунках размещены графики, посчитанные для интервала дистанций 1—10 км, в правой колонке — 10—100 км.

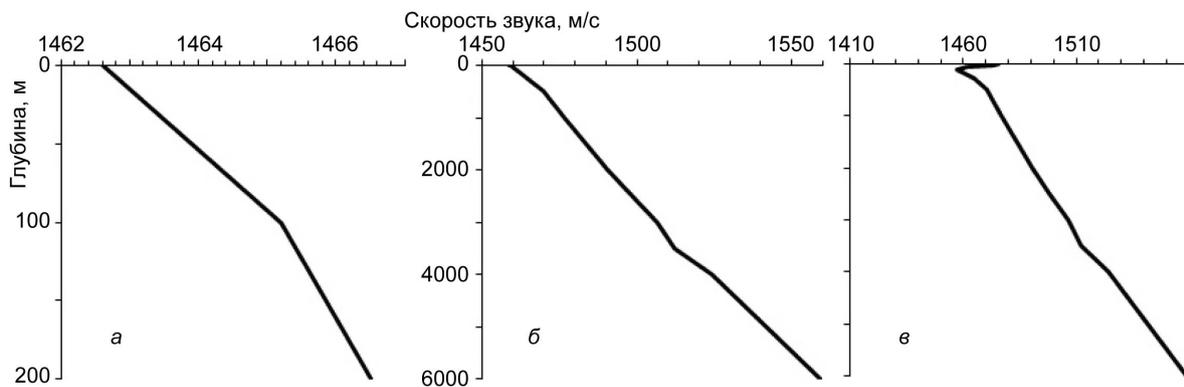


Рис. 2. Вертикальное распределение скорости звука в районах, для которых выполнялись расчеты.
 а — мелкое море, зима; б — глубокое море, зима; в — глубокое море, лето.

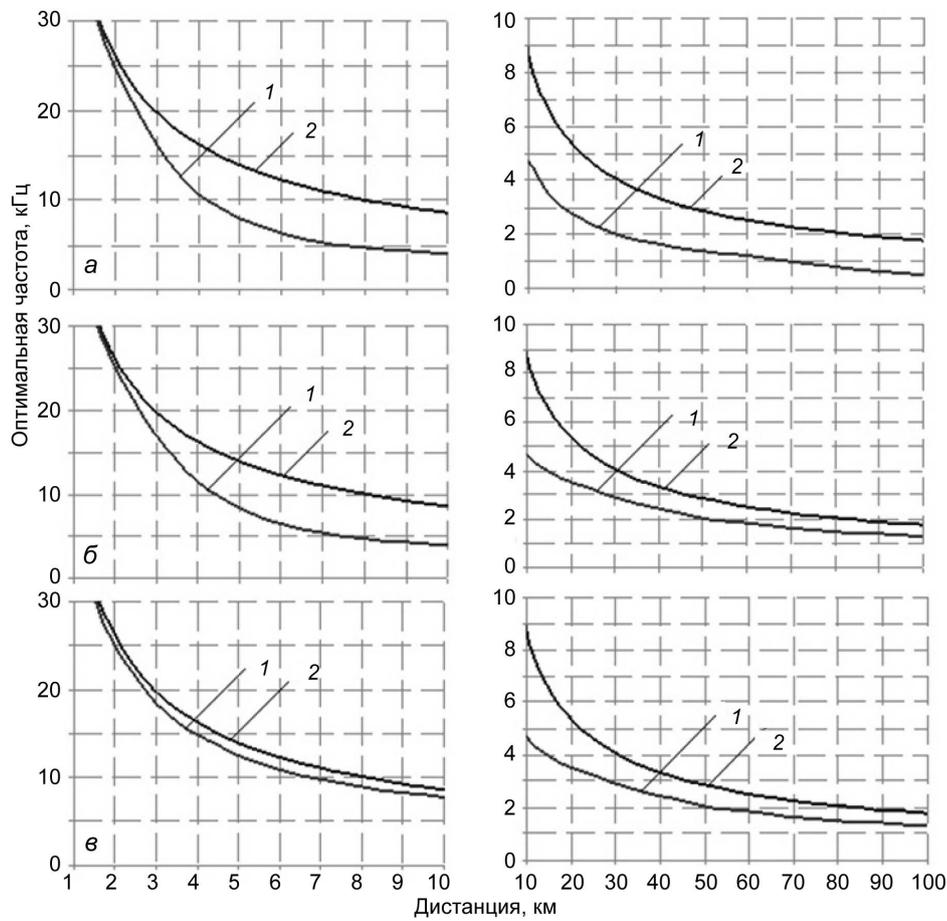


Рис. 3. Зависимости оптимальной частоты от дистанции для режима ШП при использовании двухмерной антенны при $b_{\beta} = 0.0263$, $c_{\beta} = 1.45$ для реального волновода (1) и без учета частотной зависимости аномалии (2). а — мелкое море, зима; б — глубокое море, зима; в — глубокое море, лето.

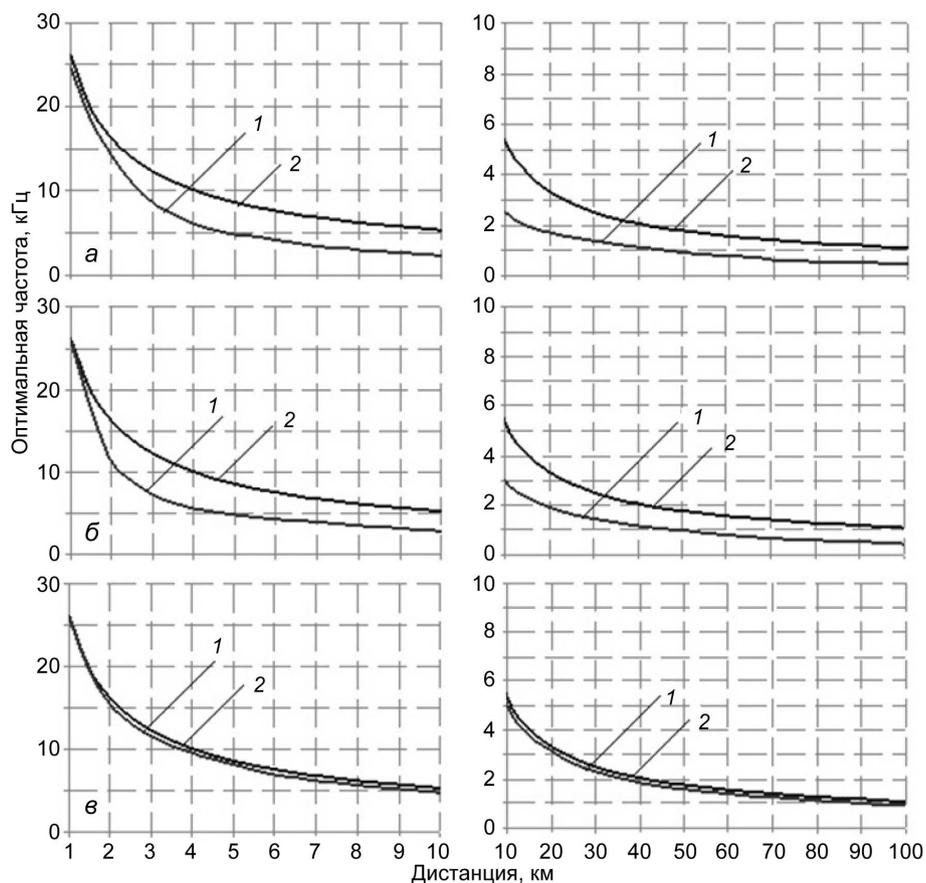


Рис. 4. Зависимости оптимальной частоты от дистанции для режима ШП при использовании линейной антенны при $b_{\beta} = 0.0263$, $c_{\beta} = 1.45$ для реального волновода (1) и без учета частотной зависимости аномалии (2). а — мелкое море, зима; б — глубокое море, зима; в — глубокое море, лето.

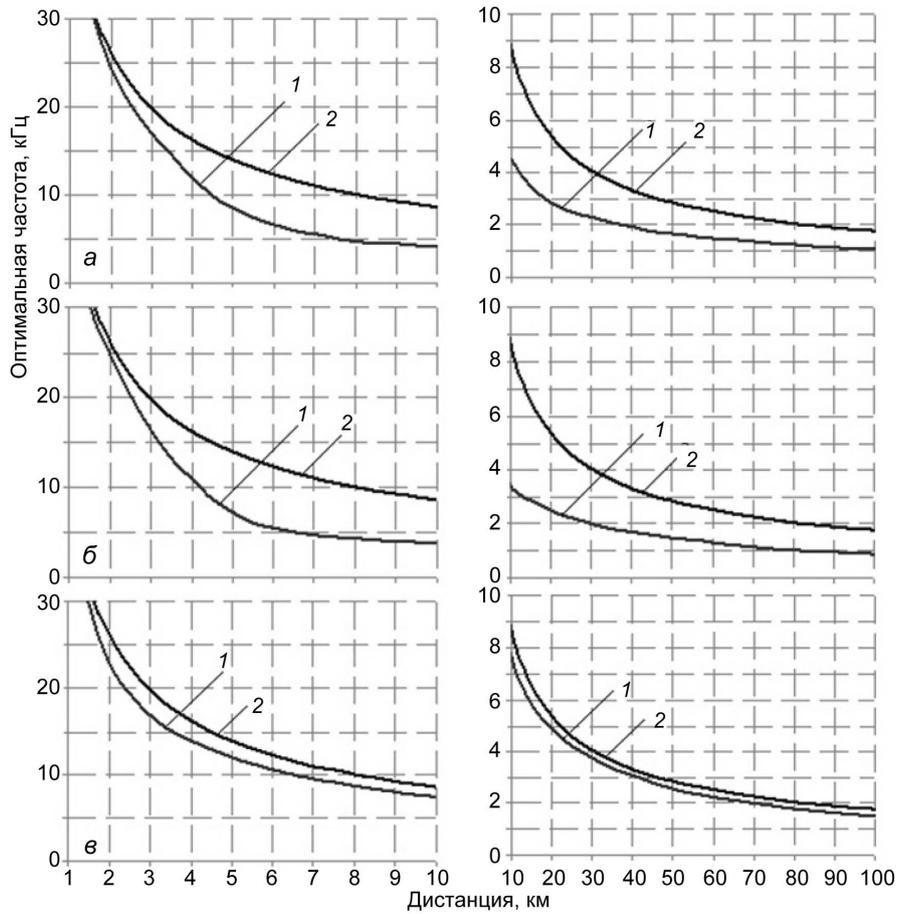


Рис. 5. Зависимости оптимальной частоты от дистанции для режима ГЛ при использовании двухмерной антенны при $b_{\beta} = 0.0263$, $c_{\beta} = 1.45$ для реального волновода (1) и без учета частотной зависимости аномалии (2).
a — мелкое море, зима; *б* — глубокое море, зима; *в* — глубокое море, лето.

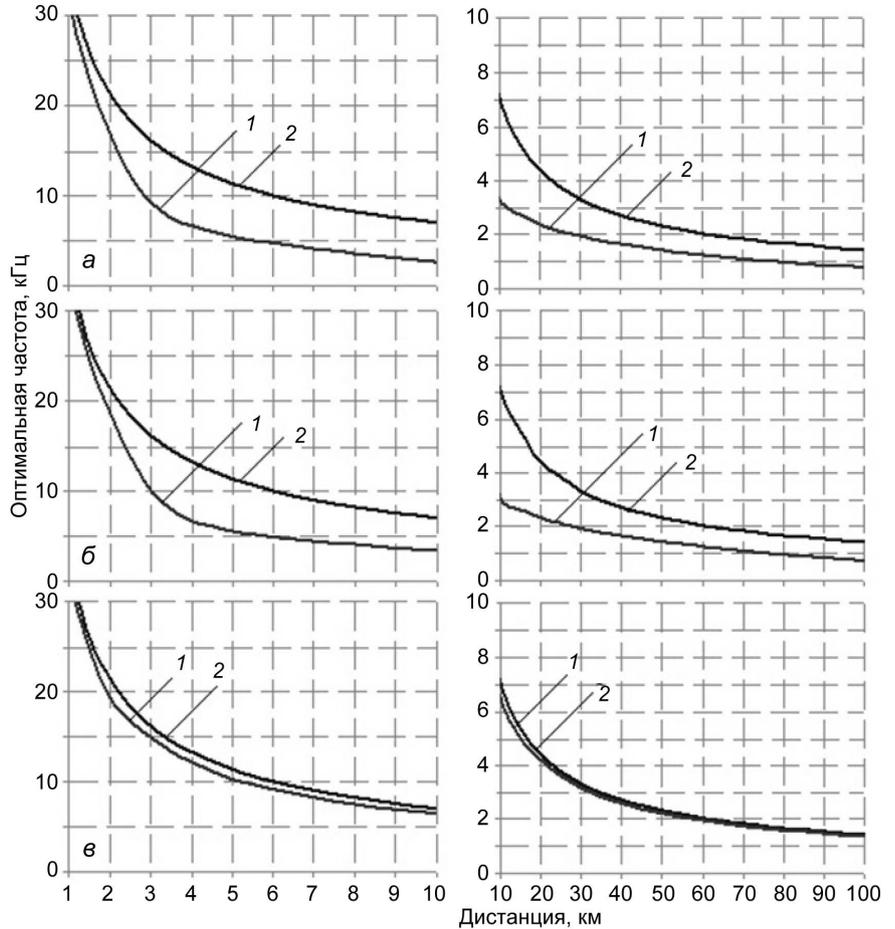


Рис. 6. Зависимости оптимальной частоты от дистанции для режима ГЛ при использовании линейной антенны при $b_{\beta} = 0.0263$, $c_{\beta} = 1.45$ для реального волновода (1) и без учета частотной зависимости аномалии (2).
a — мелкое море, зима; *б* — глубокое море, зима; *в* — глубокое море, лето.

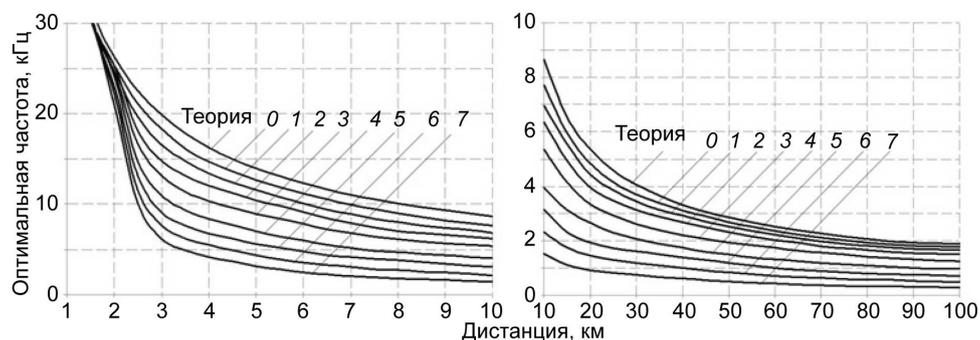


Рис. 7. Зависимости оптимальной частоты от дистанции для режима ШП при использовании двухмерной антенны при $b_{\beta} = 0.0263$, $c_{\beta} = 1.45$ для условий мелкого моря для реального волновода (кривые, обозначенные цифрами) и без учета частотной зависимости аномалии (кривые «теория»).

Цифры на кривых соответствуют волнению поверхности моря в баллах.

Обсуждение результатов. Анализ приведенных графиков приводит к ожидаемому выводу, что в реальном океаническом волноводе оптимальные частоты всегда ниже рассчитанных по упрощенной методике. Причем величина этого расхождения в результатах расчета зависит от гидроакустических условий в районе. Наибольшее расхождение имеет место в условиях положительной рефракции, когда акустическая энергия распространяется путем отражения от поверхности моря. В этих условиях на величину оптимальной частоты существенное влияние через частотную зависимость аномалии оказывает волнение поверхности моря: чем волнение больше, тем оптимальная частота ниже. Иллюстрация этого факта приведена на рис. 7, который аналогичен рис. 3, а, за исключением того, что зависимость оптимальной частоты от дистанции для реального волновода посчитана для восьми значений волнения поверхности моря.

Также заметим, что наибольшее расхождение в результатах расчета, достигающее двух и более раз, наблюдается на дистанциях 3—30 км. Это объясняется тем, что на меньших дистанциях гидроакустические условия слабо влияют на распространение сигнала, а на больших дистанциях основное влияние оказывает пространственное затухание сигнала, которое учитывается в обоих вариантах расчетов.

Проведенное исследование показало, что при выборе оптимальной частоты работы гидроакустической станции (как пассивной, так и активной) необходимо учитывать гидроакустические условия в том районе, в котором предполагается ее использование.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02928-а).

Литература

1. Хортон Дж. У. Основы гидролокации / Пер. с англ. Л.: Судпромгиз, 1961. 484 с.
2. Stewart J. L. Optimum frequencies for active sonar detection // JASA. 1961. N 1, V. 33. P. 1216.
3. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
4. Евтютов А. П., Колесников А. Е. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1982. 339 с.
5. Зарайский В. А., Тюрин А. М. Теория гидролокации. Л.: ВМОЛУА, 1975. 391 с.
6. Евтютов А. П., Митько В. Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1981. 256 с.
7. Исаак В. А. Измерение дистанции пассивными методами // Морской сборник. 1987. № 5. С. 68—70.
8. Голубев А. Г. Алгоритм оценки координат шумящего объекта в системе пассивной гидролокации // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2009. Т. 2, № 1 (3). С. 47—56.
9. Консон А. Д., Волкова А. А. Потенциальные возможности оценки расстояния методом оптимальных частот в пассивной гидролокации // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 1. С. 79—86.
10. Консон А. Д., Волкова А. А., Никулин М. Н. Оценка расстояния до источника шумового сигнала двухчастотным методом с использованием полосовых фильтров // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 2. С. 55—61.
11. Абаренов С. П., Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. О выборе частотных и пространственных параметров гидроакустических инфраконтрольно-управляющих сетей на основе обобщенных энергетических показателей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 2. С. 27—35.
12. Смартышев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. 278 с.
13. Семенов В. В., Синозерский И. В., Филин В. А. Оптимальные частоты шумопеленгования в многолучевом волноводе шельфовой зоны океана // Гидроакустика. 2007. № 7. С. 33—41.
14. Семенов В. В., Школьников И. С. Оптимизация частот гидролокатора, работающего в условиях многолучевости // Гидроакустика. 2010. № 11. С. 70—78.