

УДК 621.396.96

## Потенциальная точность интерферометрического гидролокатора бокового обзора

Р. О. Болдинов\*, А. И. Баскаков, А. В. Скарня

В настоящее время в шельфовой зоне прибрежных морей ведется активная работа по поиску новых месторождений полезных ископаемых. Их поиск, освоение, а также строительство транспортной системы требуют проведения инженерных изысканий, в том числе, и построения рельефа дна. К наиболее эффективным системам, позволяющим решать такие задачи, относится интерферометрический гидролокатор бокового обзора. Принцип его действия основан на нахождении разности фаз между двумя сигналами, отраженными от одного и того же участка поверхности дна в пределах одного элемента разрешения и принятыми двумя разнесенными в пространстве приемными антеннами. Найденная разность фаз является основой для построения рельефа.

Один из главных параметров интерферометра — точность измерения. Существует много влияющих на нее факторов, поэтому на этапе разработки системы следует выбирать режим интерферометрического зондирования и параметры съемки таким образом, чтобы минимизировать их воздействие. Особенности отражения и свойства поверхности влияют на итоговую ошибку через оценку интерферометрической разности фаз. Поэтому наибольший интерес представляет анализ погрешности, связанный именно с оценкой разности фаз. Настоящая работа посвящена решению этой задачи.

Показано, что при определенном выборе параметров интерферометра и режима съемки реальную точность измерения рельефа дна можно максимально приблизить к потенциальной точности. При заданных параметрах системы и режима съемки была определена оптимальная база интерферометра по критерию минимума среднеквадратического отклонения оценки рельефа. Исследована возможная раскорреляция отраженных сигналов за счет мелкой шероховатости поверхности дна. Результаты показали, что увеличение базы относительно оптимальной ограничено раскорреляцией сигналов за счет разноса двух приемных антенн, а уменьшение базы относительно оптимальной приводит к потере чувствительности ИГБО к неровностям рельефа дна.

Ключевые слова: интерферометрический гидролокатор бокового обзора, потенциальная точность измерения рельефа дна, оптимальная база интерферометра, СКО оценки рельефа дна.

---

### Введение

---

В настоящее время гидролокаторы являются основным техническим средством при проведении различных исследований водной толщи Земли.

---

\* BoldinovRO92@yandex.ru

Среда распространения в гидролокации — вода, так, что при построении гидролокационной системы следует учитывать ее особенности. Во-первых, это затухание, которое на рабочей частоте может достигать 100 дБ/км и более. Во-вторых, из-за непостоянства скорости звука в водной среде траектория распространения сигнала отличается от прямолинейной. В-третьих, водная среда имеет свои собственные шумы [1].

Особенность гидролокаторов заключается в использовании в них акустических колебаний.

В шельфовой зоне прибрежных морей ведется активная работа по поиску новых месторождений полезных ископаемых. Этот процесс требует проведения инженерных изысканий, в том числе и построения рельефа дна. Эффективной системой, позволяющей решать задачи построения рельефа дна, по праву считается интерферометрический гидролокатор бокового обзора (ИГБО).

Принцип действия ИГБО основан на нахождении разности фаз между двумя сигналами, отраженными от одного и того же участка поверхности дна в пределах одного элемента разрешения и принятыми двумя разнесенными в пространстве приемными антеннами.

Размер элемента разрешения по дальности определяется шириной спектра зондирующего сигнала, и составляет единицы сантиметров. Так как в ИГБО не используются методы синтеза апертуры, то разрешающая способность по азимуту определяется шириной луча диаграммы направленности (ДН) антенны в горизонтальной плоскости и расстоянием от антенны до элемента разрешения.

Один из главных параметров ИГБО — его точность. Как правило, она задается в процентах относительно глубины. Множество факторов влияет на точность и на этапе разработки системы следует выбирать режим интерферометрического зондирования и параметры съемки таким образом, чтобы минимизировать их влияние.

## Геометрия визирования ИГБО

Геометрия визирования интерферометрическим гидролокатором бокового обзора поверхности дна, состоящим из одной приемо-передающей (антенна 2) и одной приемной (антенна 1) антенн, представлена на рис. 1. Неровность рельефа высотой  $z$  на поверхности дна озвучивается двумя антеннами (1 и 2 соответственно). На рис. 1 угол отклонения плоскости базы  $B$  интерферометра от вертикали равен  $\beta$ , а угол визирования на объект на поверхности дна —  $\alpha$ . Искомая глубина в данной точке равна  $H - z$ .

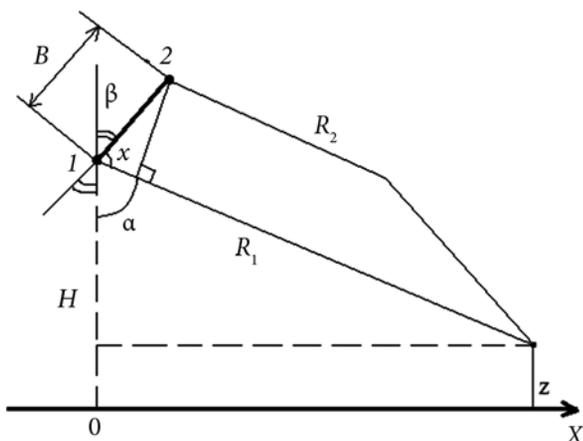


Рис. 1. Геометрия визирования ИГБО

Из рис. 1 найдем высоту  $z$  выбранной неровности:

$$z = H - R_1 \cos \alpha. \quad (1)$$

Обозначив разность хода лучей как  $\Delta R = R_1 - R_2$ , получим выражение для интерферометрической разности фаз (ИРФ) двух сигналов:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R. \quad (2)$$

## Составляющие ошибок при измерении высоты объекта

Ордината элемента разрешения высотой  $z$  является функцией нескольких параметров: глубины  $H$ , наклонной дальности  $R_1$  и ИРФ. Если предположить, что отдельные параметры некоррелированы, то общую погрешность измерения высоты можно записать в виде:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z\varphi}^2 + \sigma_{zH}^2 + \sigma_{R_1}^2,$$

где  $\sigma_{z\varphi}^2$ ,  $\sigma_{zH}^2$ ,  $\sigma_{R_1}^2$  — дисперсии оценки ординаты элемента разрешения из-за погрешностей оценки ИРФ, измерений глубины и расстояния до элемента разрешения.

Необходимо выбрать такой режим интерферометрического зондирования, при которой данные погрешности можно минимизировать

Найдем погрешность, связанную с погрешностью оценки ИРФ:

$$\sigma_{z\varphi} = \frac{dz}{d\varphi} \sigma_{\varphi} \Rightarrow \frac{dz}{d\hat{\varphi}} = \frac{dz}{d\alpha} \frac{d\alpha}{d\Delta R} \frac{d\Delta R}{d\hat{\varphi}}.$$

Из выражения (1):

$$\begin{aligned} \frac{dz}{d\alpha} &= R_1 \sin(\alpha); \\ \frac{d\alpha}{d\Delta R} &= \frac{1}{(d\Delta R / d\alpha)}. \end{aligned}$$

Вз прямоугольного треугольника с гипотенузой  $B$  (рис. 1) вычислим  $\Delta R$ :

$$\Delta R = B \cos(180 - (\alpha + \beta)) = -B \cos(\alpha + \beta).$$

Тогда

$$\frac{d\alpha}{d\Delta R} = \frac{1}{(d\Delta R / d\alpha)} = \frac{1}{B \sin(\alpha + \beta)}.$$

Из выражения (2):

$$\frac{d\Delta R}{d\hat{\varphi}} = \frac{\lambda}{2\pi}.$$

Окончательно запишем:

$$\frac{dz}{d\hat{\varphi}} = \frac{\lambda R_1 \sin(\alpha)}{2\pi B \sin(\alpha + \beta)}$$

Поскольку  $R_1 = H/\cos(\alpha)$ , получим:

$$\sigma_{z\hat{\varphi}} = \frac{\lambda H \sin(\alpha)}{2\pi B \cos(\alpha) \sin(\alpha + \beta)} \sigma_{\hat{\varphi}} \quad (3)$$

Аналогичным образом оценим остальные составляющие погрешностей.

Из формулы (1):

$$\begin{aligned} dz/dH = 1 &\Rightarrow \sigma_{zH} = \sigma_H; \\ dz/dR_1 &= \cos(\alpha). \end{aligned}$$

Существует еще один вид ошибок, связанных с шумами приемного тракта. Они независимы от пиксела к пикселу и их нельзя устранить, используя компенсационные методы. Но, так как они не сдвигают постоянную составляющую ИРФ, то их можно ослабить путем усреднения по интерферограмме.

Особенности отражения и свойства поверхности влияют на итоговую ошибку только через  $\sigma_{\hat{\varphi}}$ . Поэтому наибольший интерес представляет анализ погрешности, связанный именно с оценкой ИРФ.

Проведем оценку ИРФ с помощью метода оценки максимального правдоподобия (ОМП) [4]:

$$\sigma_{\hat{\varphi}} = \sqrt{(\varphi - \hat{\varphi})^2} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}, \quad (4)$$

где  $N$  — кратность некогерентного накопления;  $\gamma$  — коэффициент корреляции между двумя акустическими изображениями (интерферометрической парой).

## Коэффициент корреляции

Интерферометрическая когерентность или коэффициент корреляции между двумя акустическими изображениями в общем случае состоит из двух составляющих [2 — 4]: декорреляции за счет пространственного разнесения двух антенн —  $\gamma_{\text{прост}}$  и декорреляции за счет теплового шума в системе —  $\gamma_{\text{шум}}$ . Вследствие всего вышесказанного коэффициент корреляции равен:

$$\gamma = \gamma_{\text{прост}} \gamma_{\text{шум}}$$

## Пространственная декорреляция

Рассмотрим пространственную декорреляцию.

Исходя из данных рис. 2, запишем выражение для принимаемого сигнала с дальности  $R$  и азимута  $x_0$  на каждую антенну без учета шума приемного тракта:

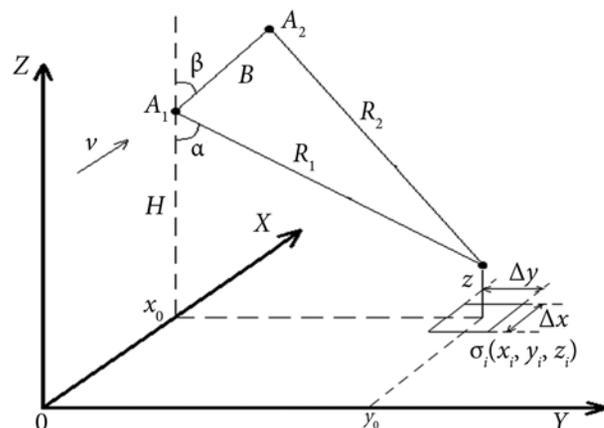


Рис. 2. Расположение базы ИГБО относительно элемента разрешения на поверхности

$$\begin{aligned} S_1(R_1, x_0) &= A[dz] \int f(x, y, z) \times \\ &\times \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} R_1\right) W(R_1 - R, x - x_0) dx dy; \\ S_2(R_2, x_0) &= A[dz] \int f(x, y, z) \times \\ &\times \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} R_2\right) W(R_2 - R, x - x_0) dx dy, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $A$  — амплитудный коэффициент;  $f(x, y, z)$  — функция рассеяния поверхности;  $R_1, R_2$  — наклонные дальности;  $W(R, x)$  — импульсный отклик гидролокатора на точечную цель.

Как уже было сказано, в ИГБО не используются методы синтеза апертуры, поэтому разрешающая способность по азимуту определяется шириной луча диаграммы направленности (ДН) антенны в горизонтальной плоскости и расстоянием от антенны до элемента разрешения. Для расчетов возьмем типичные параметры ИГБО: длина волны —  $\lambda = 3$  мм; ширина ДН —  $0,5^\circ$ ; на дальности 10 м размер элемента разрешения по азимуту будет равен 30 см при разрешении ИГБО по наклонной дальности 3 см, размер элемента разрешения по горизонтальной дальности — 4,2 см при угле визирования  $45^\circ$ . Таким образом, элемент разрешения представляет собой прямоугольник размерами 30 на 4,2 см и каждый объект внутри элемента разрешения, сравнимый с длиной волны, является элементарным отражателем. Предполагается [2], что эти парциальные отражатели независимы и для реальной поверхности дна как распределенной цели отклик от одного элемента разрешения складывается из суперпозиции элементарных отражателей, содержащихся внутри него. Следовательно, функции рассеяния являются идентичными, тогда:

$$\begin{aligned} f(x, y, z) f^*(x', y', z') &= \\ &= \sigma_0(x, y, z, \alpha) \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') \end{aligned}$$

где  $\langle \cdot \rangle$  — усреднение по ансамблю;  $\sigma_0(x, y, z, \alpha)$  — удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) при угле наблюдения  $\alpha$ ;  $\delta(\cdot)$  — дельта-функция.

Если отраженный сигнал имеет гауссову статистику [2], то характеристику отражения можно получить путем вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ):

$$S_1(R_1, x_{10})S_2^*(R_2, x_0) = A^2 \int dz \int \sigma_0(x, y, z, \alpha) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)\right) \times \\ \times W(R_1 - R, x - x_0) W^*(R_2 - R, x - x_0) dx dy. \quad (6)$$

Пусть импульсный отклик локатора равен:

$$W(R_1 - R, x - x_0) = \frac{\sin\left[\frac{\pi(R_1 - R)}{\Delta r}\right] \sin\left[\frac{\pi(x - x_0)}{\Delta x}\right]}{\pi(R_1 - R)/\Delta r \pi(x - x_0)/\Delta x},$$

где  $\Delta x$  — разрешающая способность по азимуту;  $\Delta r$  — разрешающая способность по наклонной дальности (определяется шириной спектра зондирующего сигнала).

Решение интеграла (6) описано в работе [4]:

$$S_1 S_2^* = A^2 \Delta S \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)\right] \sigma_0(\alpha) M(\Omega_z) f(\Omega_R); \\ f(\Omega_R) = 1 - \Omega_R \Delta r; \\ \Omega_z = \frac{2\pi B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \sin(\alpha)}; \\ \Omega_R = \frac{2B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \tan(\alpha)},$$

где  $\Delta S$  — площадь элемента разрешения;  $M(\Omega_z)$  — характеристическая функция мелких неровностей поверхности;  $f(\Omega_R)$  — функция «база-декорреляция»;  $\Omega_z, \Omega_R$  — пространственные частоты по координатам  $z$  и  $R$  соответственно;  $f(\Omega_R)$  определяет раскорреляцию двух сигналов за счет разности двух приемных антенн, а  $M(\Omega_z)$  характеризует раскорреляцию отраженных сигналов за счет наличия мелкой шероховатости поверхности.

Если для описания плотности распределения ординат парциальных отражателей внутри элемента разрешения применить нормальный закон, то выражение для  $M(\Omega_z)$  примет вид [4]:

$$M(\Omega_z) = \exp\left(-\frac{(\sigma_h \Omega_z)^2}{2}\right),$$

где  $\sigma_h$  — СКО мелкой шероховатости поверхности.

Отсюда выражение для ВКФ выглядит как:

$$S_1 S_2^* = A^2 \Delta S \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)\right] \times \\ \times \sigma_0(\alpha) \exp\left[-2\pi^2 \left(\frac{\sigma_h B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \sin(\alpha)}\right)^2\right].$$

В общем случае коэффициент корреляции рассчитывается по формуле [2, 4]:

$$\gamma = \frac{|S_1 S_2^*|}{\sqrt{|S_1|^2 |S_2|^2}}. \quad (7)$$

Тогда коэффициент пространственной корреляции:

$$\gamma_{\text{простр}} = \exp\left[-2\pi^2 \left(\frac{\sigma_h B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \sin(\alpha)}\right)^2\right] \times \\ \times \left(1 - \frac{2B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \tan(\alpha)} \Delta r\right).$$

### Шумовая декорреляция

Теперь рассмотрим шумовую декорреляцию.

Запишем выражения (5) с учетом шума приемных трактов:

$$S_1(R_1, x_0) = a_1(R_1, x_0) + n_1; \\ S_2(R_2, x_0) = a_2(R_2, x_0) + n_2,$$

где  $a_1(R_1, x_0), a_2(R_2, x_0)$  — принимаемые сигналы;  $n_1, n_2$  — тепловой шум приемных трактов интерферометра.

Предполагая, что шумы независимы, можно записать:

$$\langle |S_1|^2 \rangle = \langle |a_1|^2 \rangle + \langle |n_1|^2 \rangle = S_1 + N_1; \\ \langle |S_2|^2 \rangle = \langle |a_2|^2 \rangle + \langle |n_2|^2 \rangle = S_2 + N_2.$$

где  $S_1 \approx S_2 \approx S, N_1 \approx N_2 \approx N$  — мощности сигнала и шума.

Тогда, согласно выражению (7):

$$\gamma_{\text{шум}} = \frac{S}{S + N} = \frac{1}{1 + q^{-1}}, \quad (8)$$

где  $q$  — отношение сигнал/шум.

Из (8) следует, что для уменьшения декорреляции следует увеличивать отношение сигнал/шум.

### Оптимальная база интерферометра

Результирующий коэффициент корреляции равен:

$$\gamma = \gamma_{\text{простр}} \gamma_{\text{шум}} = \exp\left[-2\pi^2 \left(\frac{\sigma_h B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \sin(\alpha)}\right)^2\right] \times \\ \times \left(1 - \frac{2B \sin(\alpha + \beta)}{\lambda R \tan(\alpha)} \Delta r\right) \frac{1}{1 + q^{-1}}. \quad (9)$$

Подставим (9) в (4) и получим выражение для СКО оценки ИРФ. Для того, чтобы найти окончательное выражение для СКО оценки ординат рельефа через СКО оценки ИРФ, воспользуемся выражением (3):

$$\sigma_{z\phi} = \frac{\lambda H \sin(\alpha)}{2\pi B \cos(\alpha) \sin(\alpha + \beta)} \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}. \quad (10)$$

Выражение (10) определяет потенциальную точность интерферометра. Построим зависимость СКО оценки рельефа от размера базы интерферометра (рис. 3) построим при следующих параметрах системы: тип используемого сигнала — ЛЧМ; центральная частота —  $F_{ц} = 500$  кГц; глубина —  $H = 5$  м; кратность некогерентного накопления —  $N = 1$ ; отношение сигнал/шум —  $q = 5$ ; угол отклонения базы от вертикали —  $\beta = 30^\circ$ ; угол визирования —  $\alpha = 45^\circ$ ; ширина ДН —  $0,5^\circ$  разрешающая способность по наклонной дальности —  $\Delta r = 3$  см (ширина спектра — 40 кГц); СКО мелких неровностей поверхности ( $\sigma_h$ ) варьируется от 1 до 4 мм. СКО рельефа отметим в процентах относительно глубины  $H$ .

Из рис. 3 следует, что увеличение мелкой шероховатости поверхности дна существенно влияет на

СКО оценки рельефа при использовании базы больше 25 см.

Зависимость СКО рельефа от размера базы интерферометра при различных значениях ширины полосы спектра зондирующего сигнала показано на рис. 4. Зафиксируем СКО мелких неровностей поверхности ( $\sigma_h = 3$  мм).

Результаты расчетов показали, что при увеличении ширины спектра сигнала значение оптимальной базы увеличивается.

Представляет интерес также зависимость относительной СКО оценки рельефа от отношения сигнал/шум (рис. 5).

Сведем количественные значения в таблицу.

Из рис. 5 и данных таблицы очевидно, что при увеличении отношения сигнал/шум точность определения рельефа повышается, также уменьшается размер оптимальной базы.

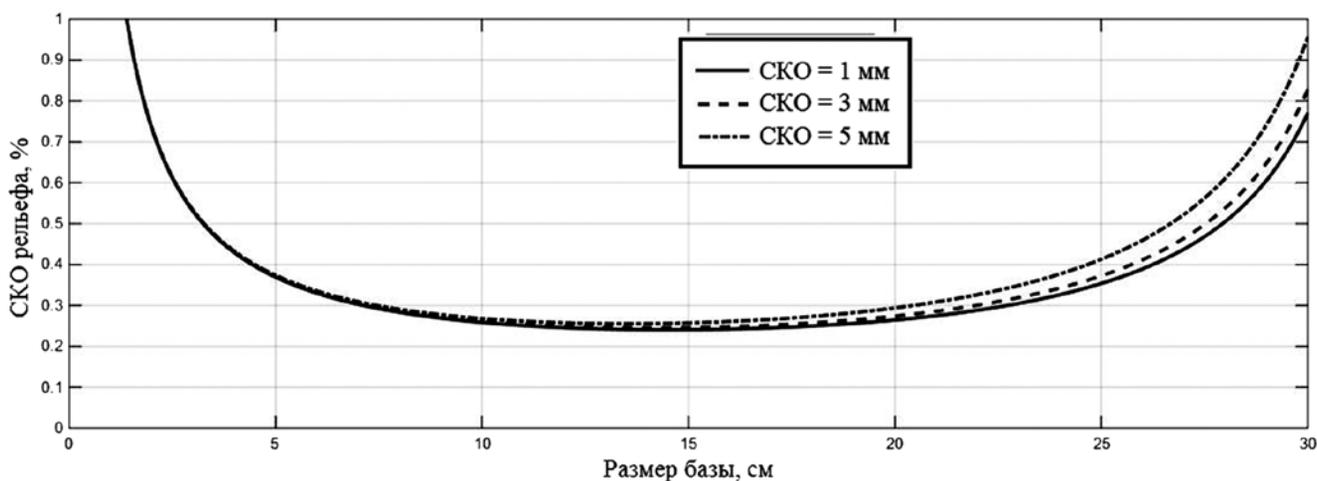


Рис. 3. Зависимость СКО оценки рельефа от размера базы интерферометра при различной величине мелкой шероховатости поверхности дна

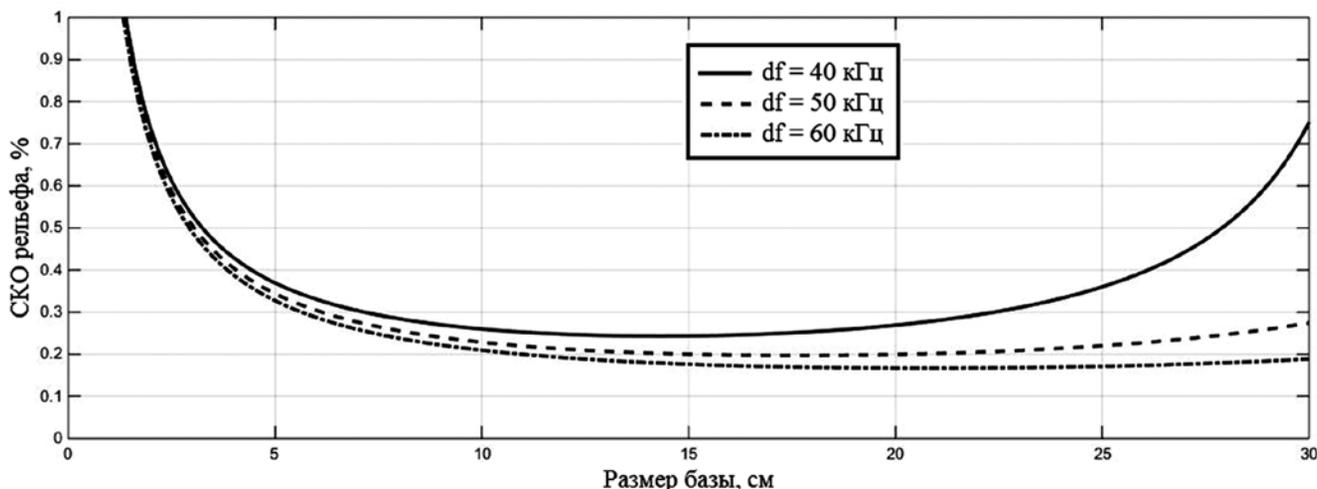


Рис. 4. Зависимость относительной СКО оценки рельефа от размера базы при различной ширине спектра зондирующего сигнала ИГБО

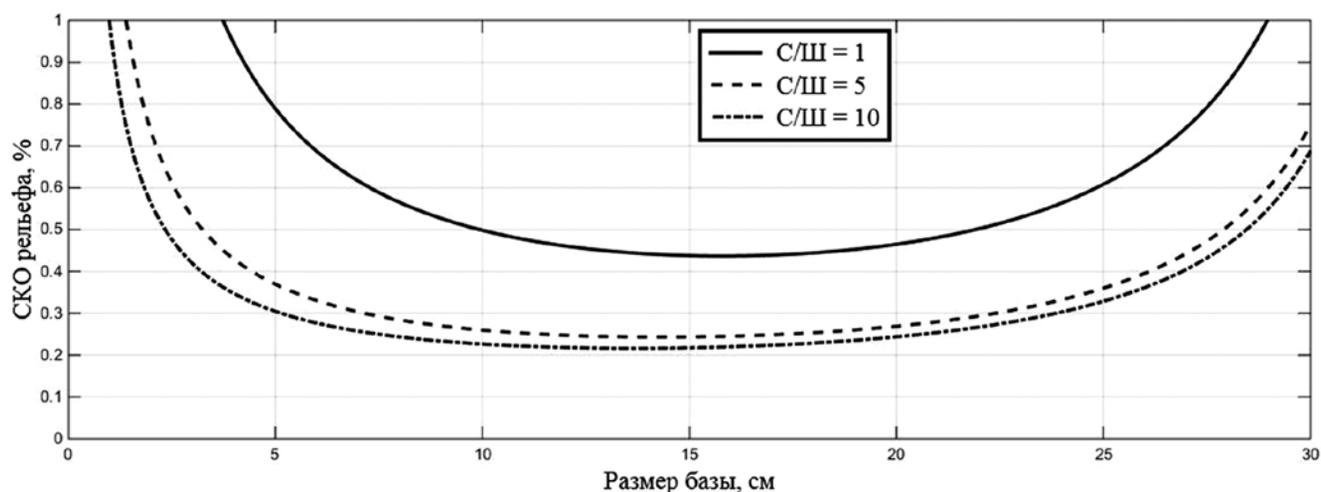


Рис. 5. Зависимость относительной СКО оценки рельефа от размера базы интерферометра при различных значениях отношения сигнал/шум

#### Значения оптимальных баз

$q$	1	5	10
$B_{\text{опт}}, \text{ см}$	15,3	13,5	13

#### Выводы

В результате расчета определены предельные возможности ИГБО при заданных параметрах интерферометрической съемки, рассчитано оптимальное значение базы, соответствующее потенциальной точности оценки рельефа дна. Увеличение базы относительно оптимальной, с одной стороны, ограничено раскорреляцией сигналов за счет разнеса двух приемных антенн, а с другой стороны, уменьшение базы относительно оптимальной приводит к потере чувствительности ИГБО к неровностям рельефа дна. Исследована также возможная раскорреляция отраженных сигналов за счет мелкой шероховатости поверхности дна.

#### Литература

1. Евтютов А.П. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988.
2. Sintes C., Llorc-Pujol G., Gueriot D. Coherent probabilistic error model for interferometric sidescan sonars // IEEE J. Oceanic Eng. 2010. N 2. V. 35. P. 412 — 423.
3. Zebker H.A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. N 5. V. 30. P. 950 — 959.
4. Баскаков А.И., Ка Мин Хо. Анализ влияния фазовых шумов на точностные характеристики интерферометрических РСА с «жесткой» базой // Исследование Земли из космоса. 1998. № 2. С. 43 — 50.

Статья поступила в редакцию 04.03.2016