

УДК 681.883.482

© А.П. Мартынюк, начальник комплексной
научно-исследовательской лаборатории

АО «НИИ “RIF-ACVAAPARAT”», г. Бэлць (Молдова)

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭХО-СИГНАЛА ДОПЛЕРОВСКОГО ЛАГА

Рассмотрена модель эхо-сигнала доплеровского лага, учитывающая механизм формирования и влияние структуры неровностей дна. Выполнен анализ и установлена связь динамики модуля и мгновенной частоты. Подтверждена адекватность модели реальным сигналам доплеровского лага.

ДОПЛЕРОВСКИЙ ЛАГ, ЭХО-СИГНАЛ, НЕРОВНОСТИ ДНА, МГНОВЕННАЯ ЧАСТОТА, АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Исследование структуры эхо-сигналов доплеровского лага является чрезвычайно важной проблемой с точки зрения оценки и достижения потенциальной точности измерения скорости доплеровским лагом. Несмотря на довольно большое количество материалов по моделям эхо-сигналов, теория вопроса еще далеко не завершена. Это объясняется как обилием факторов, которые приходится принимать во внимание для построения модели, отвечающей нуждам современного эксперимента, так и необходимостью уточнения тех приближенных решений, которыми мы уже располагаем.

Максимальное приближение математической и физической моделей к реальному сигналу смещает акцент в исследованиях в сторону лабораторных экспериментов и позволяет значительно сократить время на натурные эксперименты и испытания и, таким образом, снизить материальные затраты на исследования.

Механизм формирования и спектральные характеристики эхо-сигналов, определяющие в известной степени точность измерения, рассмотрены в [1].

Анализ спектра эхо-сигнала при излучении непрерывных немодулированных колебаний приведен в [1, 2], где огибающая спектральной плотности эхо-сигнала описывается квадратом функции, описывающей диаграмму направленности антенны. Анализ математической дискретной модели эхо-сигнала с целью снижения флуктуационной погрешности измерения посвящена работа [3].

В этой работе рассмотрена дискретная модель эхо-сигнала гидроакустического доплеровского лага, в которой эхо-сигнал представляет собой суперпозицию элементарных гармонических составляющих:

$$S(t) = \sum_{p=1}^K A_p(\omega_p) \cos(\omega_p t + \Delta\Psi_p), \quad (1)$$

где ω_p – частота p -й гармонической составляющей;

$\Delta\Psi_p$ – фаза p -й гармонической составляющей (случайная величина, равномерно распределенная в пределах от $-\pi$ до $+\pi$);

$A_p(\omega_p)$ – амплитуда p -й спектральной гармонической составляющей с частотой ω_p . Распределение амплитуд A_p спектральных гармонических составляющих определяется формой характеристики направленности (ХН) и описывается следующим образом:

$$A_p(\omega_p) = \exp \left[\frac{(\omega_p - \omega_n)^2}{\Delta \omega_q^2} \pi \right], \quad (2)$$

где ω_n – частота приема, $\omega_n = \omega_u + \omega_q$;

ω_u – излучаемая частота;

ω_q – доплеровское смещение;

$\Delta \omega_q = 2\pi \Delta f$;

Δf – доплеровская ширина спектра эхо-сигнала по уровню – 3 дБ.

С учетом (2) модель эхо-сигнала представляется следующей формулой:

$$S(t) = \sum_{p=1}^K \exp \left[\frac{(\omega_p - \omega_n)^2}{\Delta \omega_q^2} \pi \right] \cdot \cos(\omega_p t + \Delta \Psi_p). \quad (3)$$

В работе [4] рассматривается модель сигнала (3), в которой учитывается деформация огибающей спектра, возникающая в связи с различием протяженности трассы распространения сигнала в пределах характеристики направленности и большим затуханием высокочастотных составляющих спектра сигнала. В приведенных моделях влияние неровностей донной подстилающей поверхности учитывается случайным равномерным распределением начальной фазы в пределах от $-\pi$ до $+\pi$, что не в полной мере отражает процесс формирования эхо-сигнала.

Наиболее общим, а главное, охватывающим практически важный случай поверхностей, неровности которых образованы естественными причинами, является подход, использующий статистическое описание как самой поверхности, так и рассеянных ею волн посредством случайных полей [5].

В литературе [6, 7] достаточно полно представлены статистические характеристики (энергетический спектр, автокорреляционная функция и др.) радиосигналов, отраженных от земной поверхности, которые в известной степени могут быть распространены и на гидроакустические эхо-сигналы. В настоящем материале сделана попытка увязать статистические характеристики дна с детерминированными характеристиками дискретной модели эхо-сигналов доплеровского лага с целью довести модель эхо-сигнала до уровня, удобного для лабораторного моделирования.

Известно [8, 9, 10], что дно океана является статистически неровной поверхностью, в значительной степени определяющей структуру эхо-сигнала. Вертикальный масштаб неровностей обычно характеризуют параметром Рэлея:

$$P = 2 n \sigma \cdot \cos \Theta_o, \quad (4)$$

где $n = \frac{\omega}{c}$ – волновое число;

Θ_o – угол падения звуковой волны;

σ – среднеквадратичное смещение неровной поверхности от ее среднего уровня.

Параметр Рэлея P определяется двумя факторами: высотой неровностей, выраженной в длинах волн звука, и углом падения. При $\frac{\sigma}{\lambda} \rightarrow 0$, где λ - длина волны или $\Theta_0 \rightarrow \frac{\pi}{2}$, $P \rightarrow 0$, рассеяние отсутствует, отражение становится зеркальным.

При $P \ll 1$ неровности считаются малыми, поверхности слабо рассеивают звук, основная часть звуковой энергии распространяется в направлении зеркального отражения в виде когерентной волны. Значение $P \gg 1$ соответствует крупным неровностям, вызывающим сильное рассеяние звука в относительно широком угловом диапазоне.

В горизонтальных направлениях неровности характеризуются пространственным интервалом корреляции. Для достижения большей достоверности целесообразно модель (3) дополнить компонентой, характеризующей случайный характер распределения рассеивателей в озвученной зоне, а также неравномерность коэффициентов обратного рассеивания в пределах озвученной зоны. Учет влияния случайного характера распределения рассеивателей на амплитуду спектральных составляющих произведем с помощью введения амплитудного коэффициента в модель (3). В некотором приближении структуру неровностей можно представить в следующем виде:

$$K(p, m) = (1 - w |\cos(\Omega P - J_m)|) N(p, m), \quad (5)$$

где w – коэффициент, зависящий от параметра Рэлея;

$$\Omega = 2\pi \frac{1}{\Delta X};$$

ΔX – пространственный интервал корреляции (квазипериод неровностей) крупных неровностей дна вдоль некоторой оси X ;

J_m – начальная фаза неровностей, равномерно распределенная в диапазоне от $-\pi$ до π , m – номер реализации эхо-сигнала;

P – номер элементарного рассеивателя соответствующий p -му элементарному лучу в пределах ХН и определяющий p -ю спектральную компоненту;

$N(p, m)$ – случайная величина равномерно распределенная в пределах от 1 до 1,1 и характеризующая неравномерности коэффициента обратного рассеивания, обусловленная случайным распределением и положением рассеивающих неровностей в пределах озвученной площадки.

Введем в модель (3) коэффициент неравномерности:

$$S(t) = \sum_{p=1}^k \exp \left[\frac{(\omega_p - \omega_n)^2}{\Delta \omega_q^2} \cdot \pi \right] \cdot \cos(\omega_p t + \Delta \Psi_p) \cdot K(p, m). \quad (6)$$

Для моделирования эхо-сигнала, рассеянного донной поверхностью с учетом влияния неровностей дна, представим сигнал (6) с учетом (5) в следующем виде:

$$S(t) = \sum_{p=1}^{141} A_p [\cos(\omega_p t + \Delta \Psi_p)] (1 - w |\cos(\Omega \cdot p - J_m)|) N(p, m), \quad (7)$$

где ω_p – частота p -й гармонической составляющей;
 A_p – амплитуда p -й гармонической составляющей с частотой ω_p .

$$A_p(\omega_p) = \exp[-b_{1,2}(\omega_p - \omega_n)^2]. \quad (8)$$

Коэффициент b учитывает деформацию огибающей спектра [4]; для $\omega_p < \omega_n$ коэффициент $b = b_1$, для $\omega_p > \omega_n$ $b = b_2$.

Пусть неровную поверхность можно описать выражением (5), пространственный интервал корреляции вдоль некоторой оси X приравняем квазипериоду косинусоидально неровной поверхности, т.е. $\Delta X = \Lambda$, тогда квазичастота неровностей дна будет равна $\Omega = 2\pi/\Lambda$. Считаем, что каждому значению p от 1 до 141 соответствует элементарный луч, ориентированный под углом Θ_i в характеристике направленности.

Рассматриваемая модель показана на рис. 1, где Λ – пространственный период неровной поверхности; px – индекс по координате X , соответствующий p – порядковому номеру гармонической составляющей. Для учета неровностей дна амплитуду p -й гармонической составляющей в m -й реализации эхо-сигнала представим как произведение $A(p, w, k, m) = A_p \cdot K_m(p, w, k, m)$, в котором множитель $K_m(p, w, k, m)$ учитывает неровность поверхности для каждой p -й составляющей в m -й реализации (цикле измерения):

$$K_m(p, w, k, m) = N_m(p, m) \cdot (1 - w |\cos(\Omega \cdot p + \varphi_m(p, m))|), \quad (9)$$

где m – номер реализации;

$\Lambda = \Delta p/k$; Δp – интервал значений p , соответствующий диапазону частот $\Delta F_{0,707}$ для значений амплитуд не менее 0,707, что соответствует диапазону углов наклона “элементарных” лучей характеристики направленности в пределах $\Delta \Theta_{0,707}$, для которых значение характеристики направленности не менее 0,707;

k – коэффициент, учитывающий квазипериод изменения неровностей, рассматривались значения $k=3, 10$;

$N_m(p, m)$ – случайное число от 0,9 до 1, всего 141 значение для каждой из m реализаций;

w – параметр, характеризующий степень неровностей рассеивающей поверхности, рассматривались значения $w=0,1; 0,3$;

$N_m(p, m)$ – случайное число от минус 0,9 до плюс 1, всего 141 значение для каждой из m реализаций.

На рис. 2 показаны результаты промежуточных расчетов членов выражения (9) и значений амплитуд $A(p, w, k, m)$ для одной реализации ($m=1$) при $w=0,1; k=10$ и значений p от 51 до 91, соответствующих значениям частот в диапазоне $\Delta F_{0,707}$.

На рис. 3 показаны значения амплитуд A_p (без учета неровностей дна) и значения амплитуд с учетом неровностей дна $A(p, w, k, m)$ для одной реализации ($m=1$) для $k=10$ и $w=0,1; 0,3$.

На рис. 4 показаны значения амплитуд для пяти реализаций ($m=1,2...5$) и значения амплитуд, усредненные по пяти реализациям для случая $k=10$ при $w=0,3$.

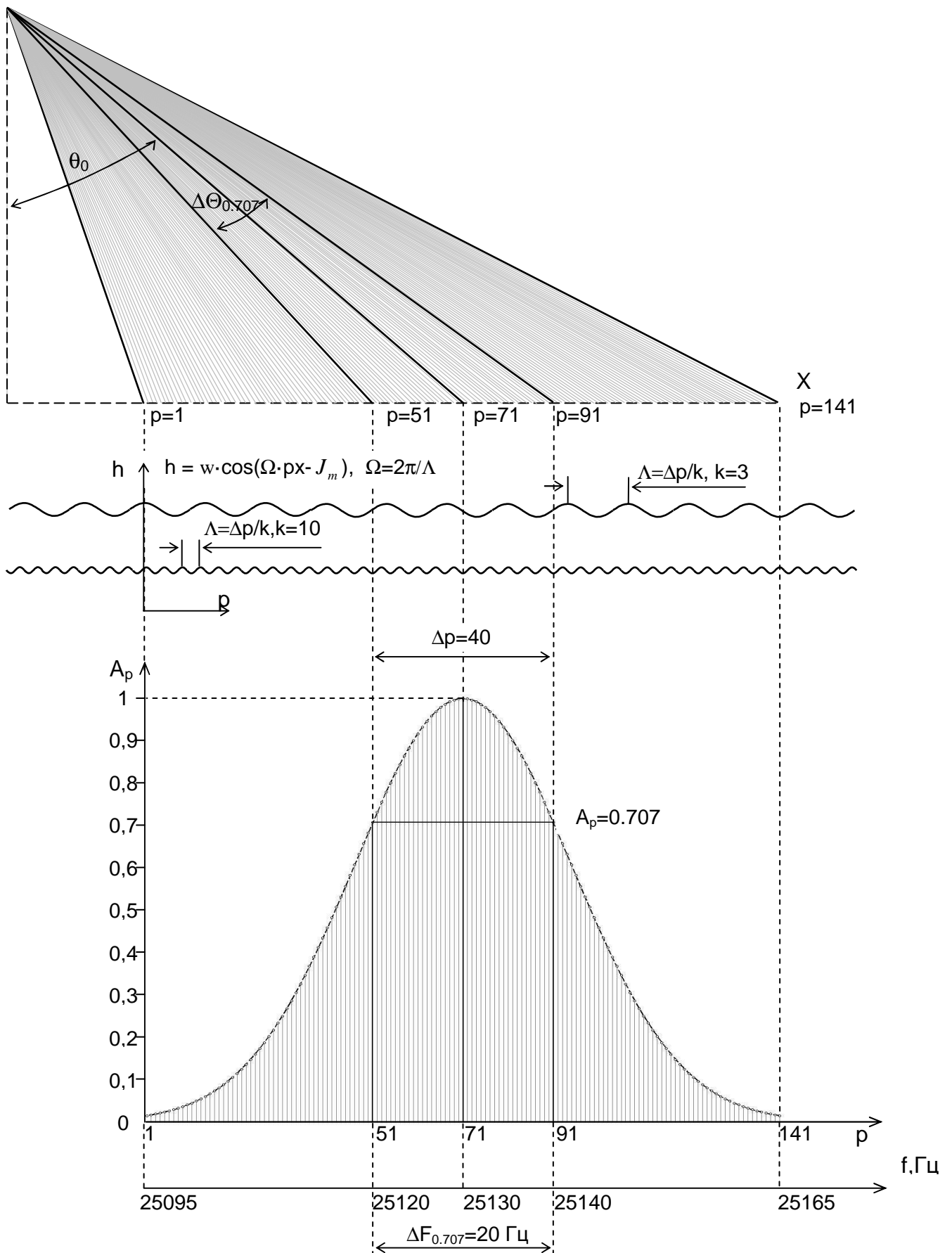


Рис. 1 – Представление гармонических составляющих сигнала для учета неровностей дна и формы ХН антенны в модели сигнала (для наглядности изменена пропорция ХН и формы огибающей распределения амплитуд)

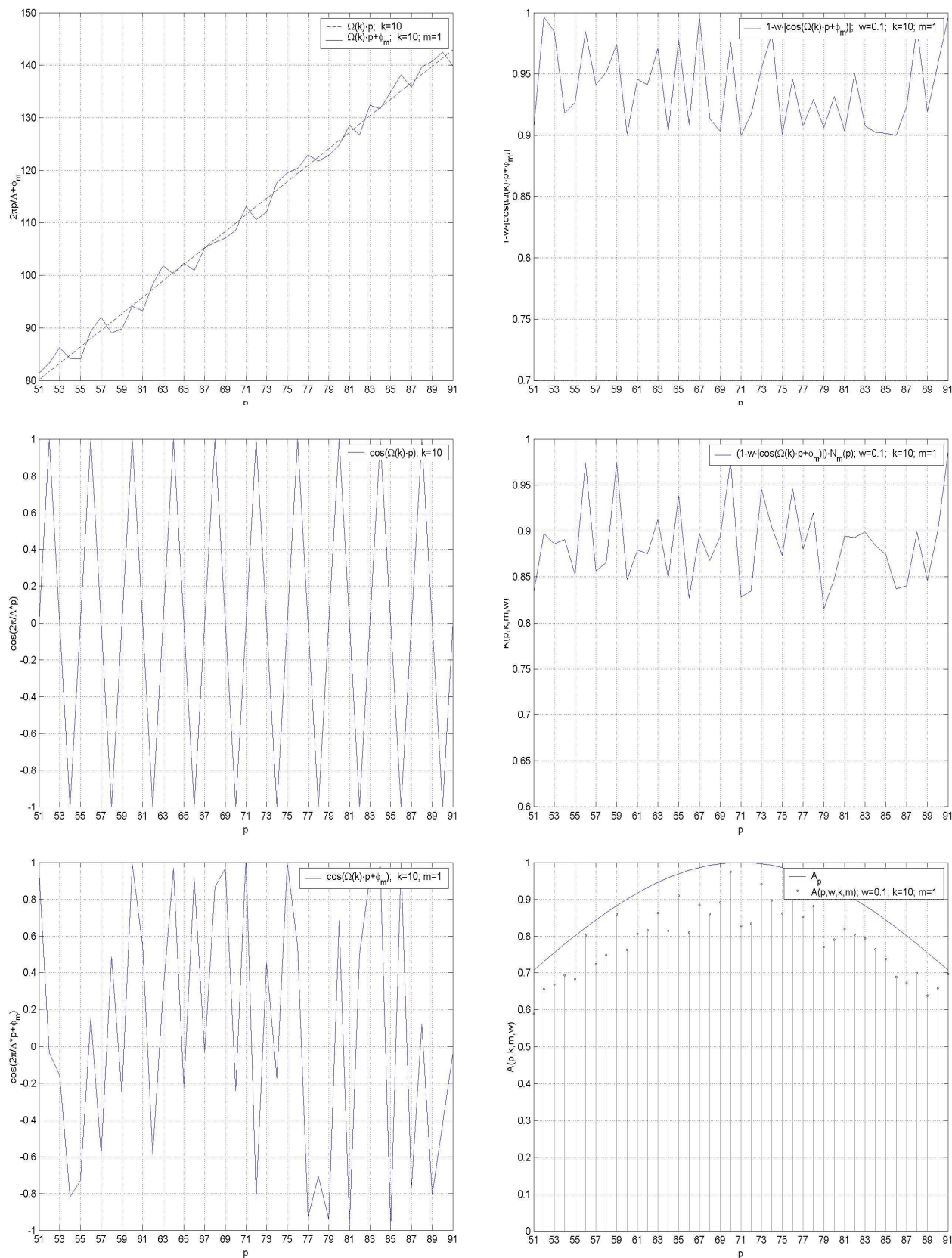


Рис. 2 – Результати проміжних розрахунків членів амплітудного множителя $K_m(p, w, k, m)$ і значень амплітуд $A(p, w, k, m)$ спектральних складових для одної реалізації ехо-сигналу, $m=1$ при $k=10; w=0,1$

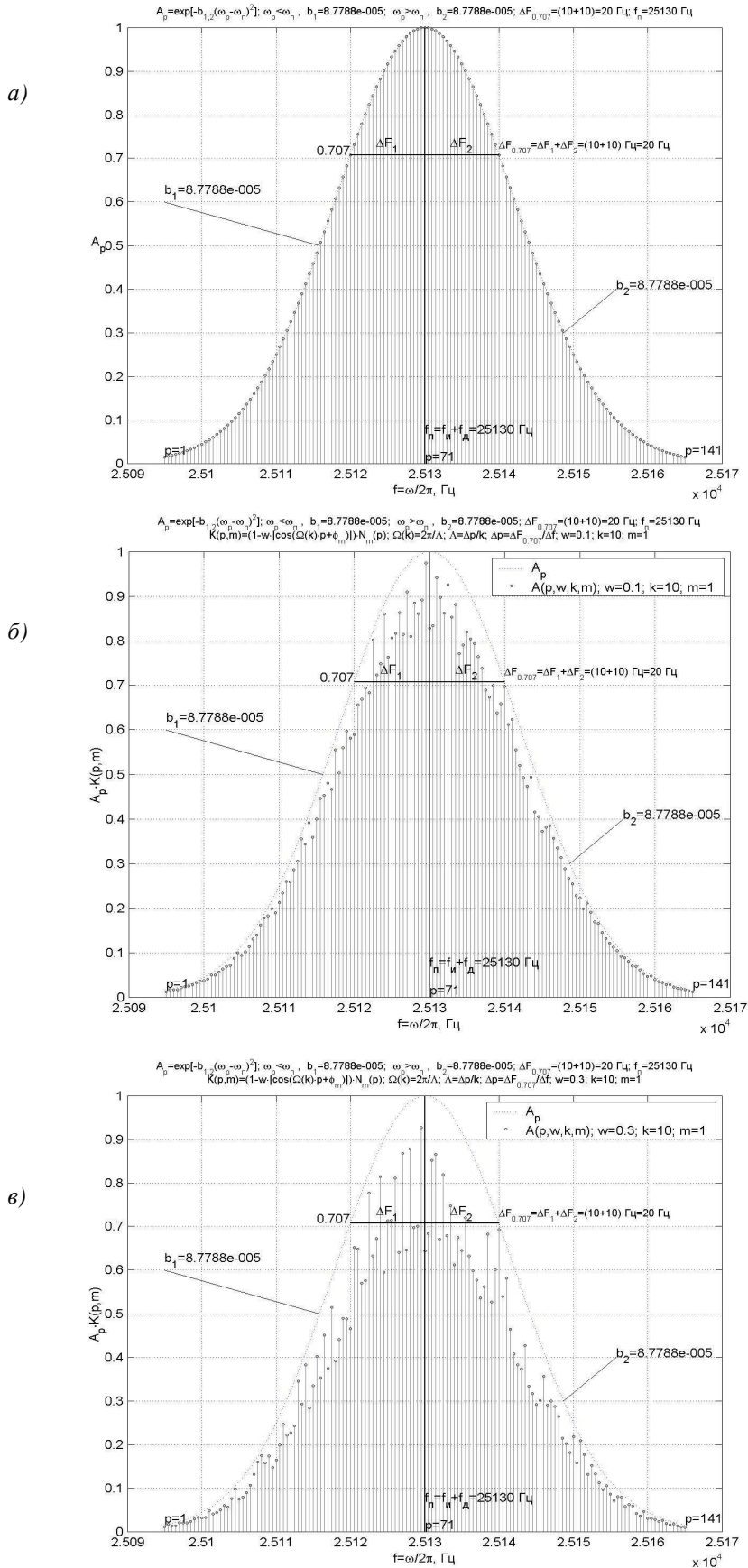


Рис. 3 – Распределение амплитуд гармонических составляющих:
 а) без учета неровностей; б) с учетом неровностей дна, $t=1$; $k=10$; $w=0.1$;
 в) с учетом неровностей дна, $t=1$; $k=10$; $w=0.3$

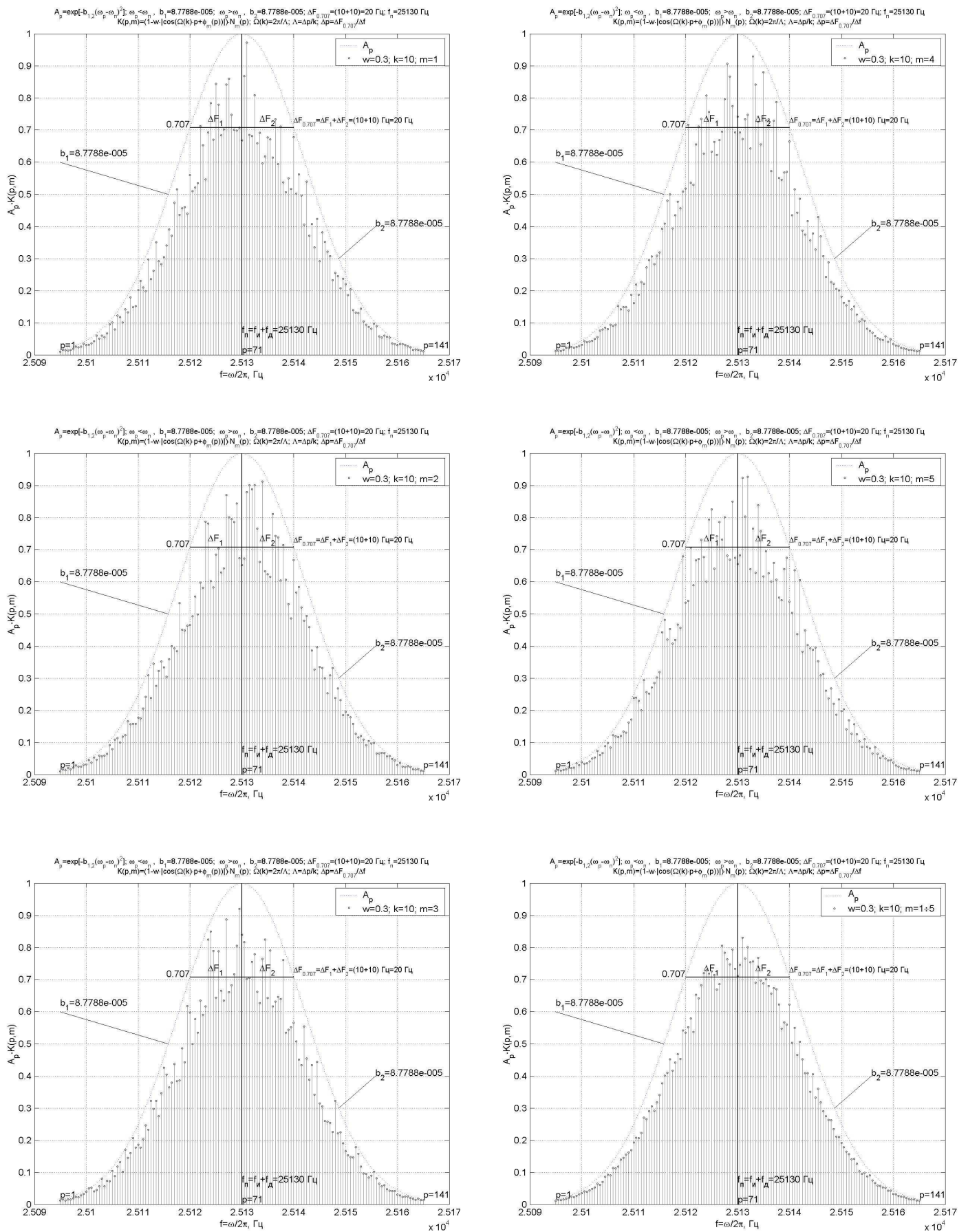


Рис. 4 – Распределение амплитуд гармонических составляющих для пяти реализаций $m=1 \div 5$; и амплитуд, усредненных по пяти реализациям для случая $k=10$; $w=0.3$

Используя элементы теории аналитического сигнала для сигнала (7), являющегося суммой 141 гармонических составляющих, аналитический сигнал $Z(t)$ представим в виде суммы действительной и мнимой компонент как:

$$Z(t) = S(t) + j\bar{S}(t). \quad (10)$$

Модуль аналитического сигнала определяется как:

$$|Z(t)| = \sqrt{S(t)^2 + \bar{S}(t)^2}, \quad (11)$$

временная зависимость фазы аналитического сигнала рассчитывается как:

$$\psi(t) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(Z(t))}{\text{Re}(Z(t))}\right) = \arctg\left(\frac{\bar{S}(t)}{S(t)}\right). \quad (12)$$

Мгновенная круговая частота ω_{inst} аналитического сигнала рассчитывается как производная фазы по времени $\omega_{inst}(t) = \frac{d(\Psi(t))}{dt}$, соответственно, мгновенная частота f_{inst} определяется как:

$$f_{inst}(t) = \frac{\omega_{inst}(t)}{2\pi}. \quad (13)$$

Расчеты мгновенной частоты и модуля аналитического сигнала по приведенным выше формулам были проведены для $f_u=25000$ Гц, $f_d=130$ Гц, $f_n=f_u+f_d=25130$ Гц, $\Delta F_{0.707}=20$ Гц, что при значении угла наклона $\theta=23^\circ$, соответствует скорости движения носителя около 10 м/с.

Для нескольких вариантов случайного распределения амплитуд A_p и фаз рассматривались реализации длительностью 1,8 с. Расчеты выполнялись с шагом по времени $1 \cdot 10^{-5}$ с, для каждого варианта было рассчитано по 180000 значений мгновенной частоты аналитического сигнала f_{inst} и модуля аналитического сигнала $|Z|$.

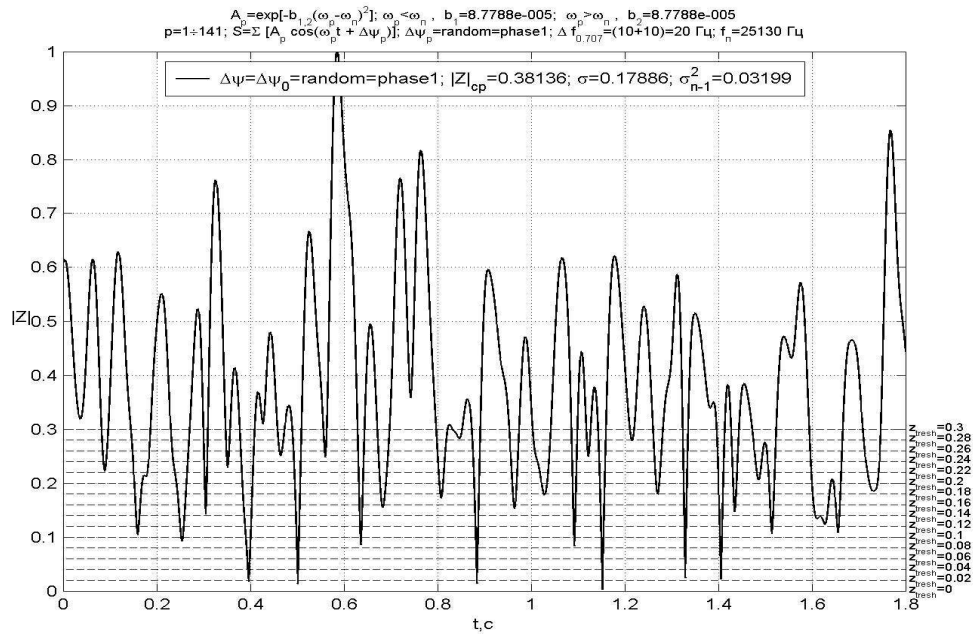
Рассчитывались среднеарифметические значения f_{cp} , медианы f_{med} , среднеквадратичные отклонения σ , дисперсии σ_{n-1}^2 значений мгновенной частоты аналитического сигнала f_{inst} и модуля аналитического сигнала $|Z|$.

Медиана x_{med} определялась как число, которое является серединой множества чисел (половина чисел имеют значения бóльшие, чем медиана, а половина чисел имеют значения меньшие, чем медиана). Графические зависимости приведены для одной из реализаций.

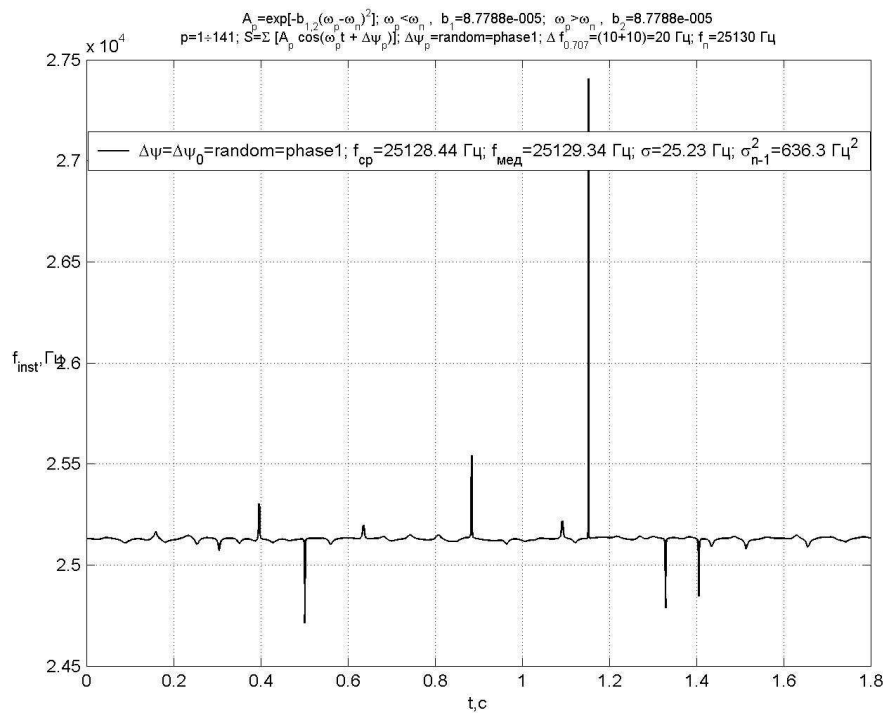
Из графических зависимостей $|Z|(t)$ и $f_{inst}(t)$ (рис. 5) видна очевидная связь флуктуации мгновенной частоты и $f_{inst}(t)$ и величины модуля $|Z|(t)$.

Из рассчитанных 180000 значений мгновенной частоты f_{inst} отбирались значения мгновенной частоты f_{inst} , для которых модуль $|Z|$ превышает заданный порог z_{tresh} . По отобраным значениям рассчитывались гистограммы частоты попадания значений мгновенной частоты f_{inst} , отобранных по критерию $|Z| > z_{tresh}$, в интервалы шириной 1 Гц, рис. 6.

Для значений f_{inst} , отобранных по критерию $|Z| > z_{thresh}$, рассчитаны максимальные значения f_{max} , минимальные значения f_{min} – рис. 7; среднеарифметические значения f_{cp} , медианы f_{med} – рис. 8; среднеквадратичные отклонения σ , количество значений $n\%$ мгновенной частоты f_{inst} , отобранных по критерию $|Z| > z_{thresh}$ в процентах от общего числа рассчитанных значений – рис. 9.



а)



б)

Рис. 5 – Временная зависимость:
а) модуля $|Z|$; б) мгновенной частоты f_{inst} ; случай $b_1=b_2$; $\Delta\psi=phase1$

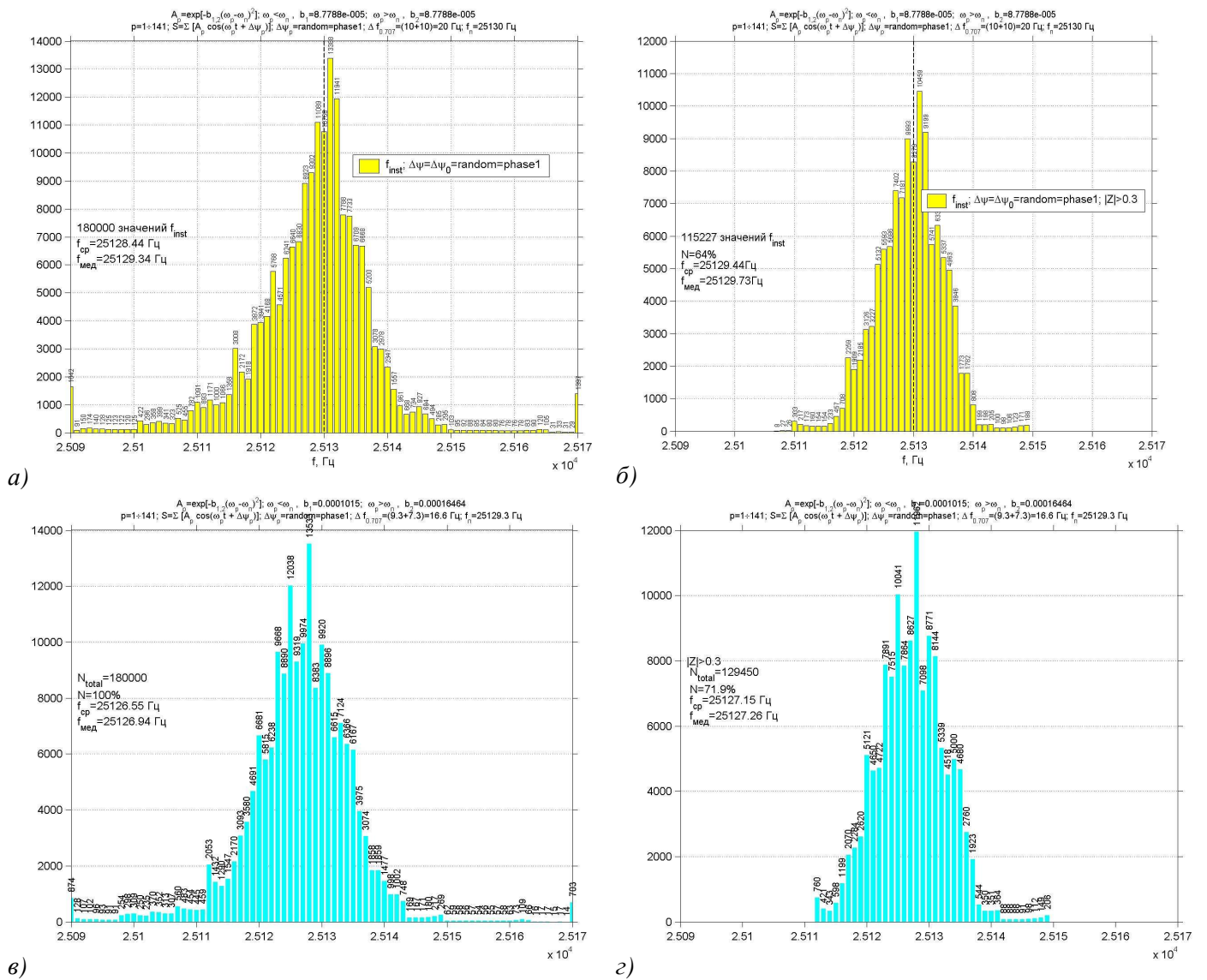


Рис. 6 – Гистограмма частот попадания значений мгновенной частоты f_{inst} в интервалы шириной 1 Гц, $\Delta\psi = \text{phase}1$, отобранных по критерию $|Z| > z_{\text{resh}}$ а) $|Z| > 0$; б) $|Z| > 0.3$ при $b_1 = b_2$; в) $|Z| > 0$; г) $|Z| > 0.3$ при $b_2 > b_1$

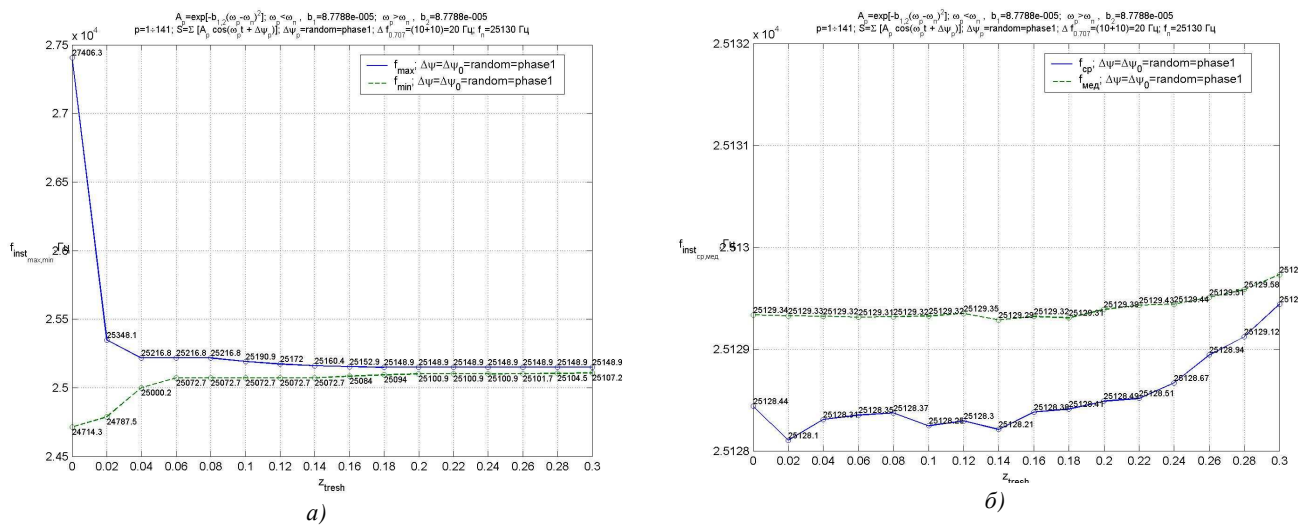


Рис. 7 – Зависимости а) максимальных и минимальных значений мгновенной частоты; б) средних значений и медиан значений мгновенной частоты для значений мгновенной частоты, отобранных по критерию $|Z| > z_{\text{resh}}$ от величины z_{resh} , $\Delta\psi = \text{phase}1$

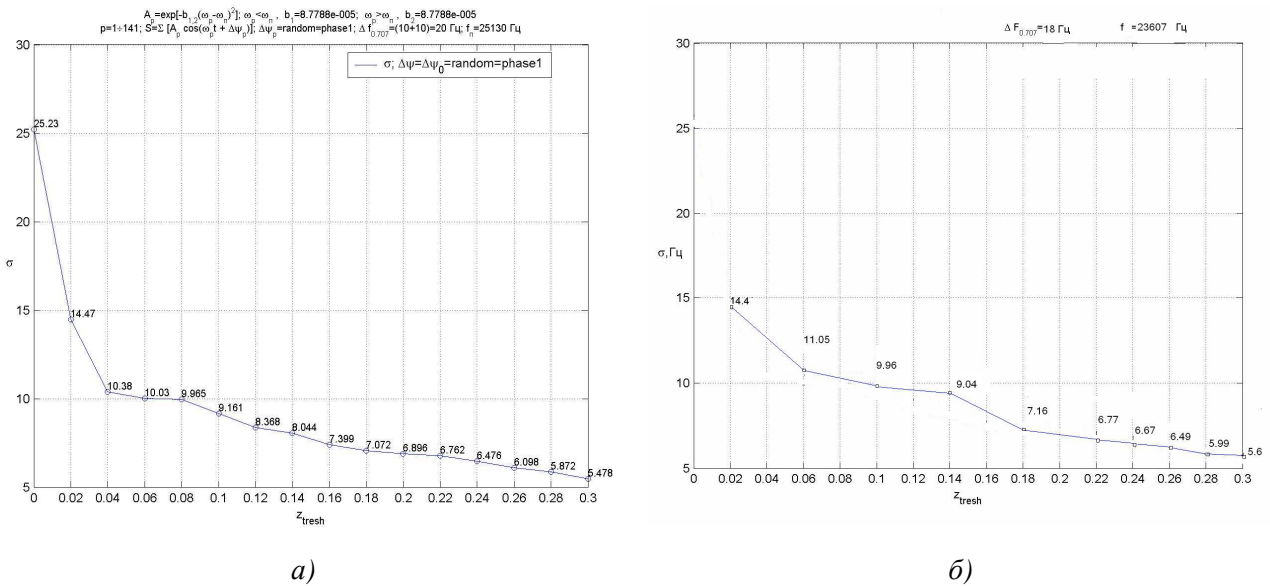


Рис. 8 – Зависимость σ -среднеквадратичного отклонения мгновенной частоты f_{inst} от величины z_{tresh} : а) модели эхо-сигнала; б) реального эхо-сигнала по одной реализации

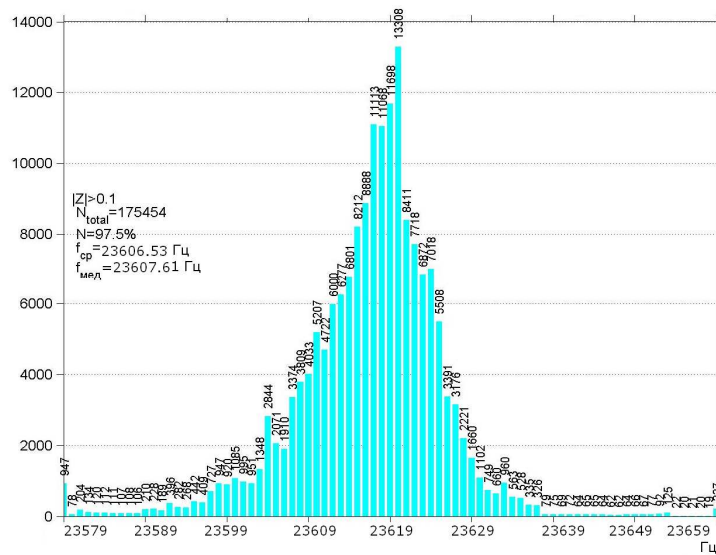


Рис. 9 – Гистограмма мгновенной частоты f_{inst} одной реализации реального сигнала, размер окна 1 Гц

Оценка эффективности модели эхо-сигнала произведена путем сравнения модели сигналов и реальных сигналов, а также результатов расчетов модели эхо-сигнала с данными, полученными при натурных испытаниях современных лагов [11] в отсутствие дестабилизирующих факторов. При длительности реализаций 1,6 и 1,8 с значения среднеквадратических отклонений измеренных значений частоты достаточно близки к значениям, полученным в процессе моделирования (рис. 8). Сравнение рис. 8а и 8б, а также гистограмм рис. 6 и рис. 9 позволяют сделать вывод о максимальном приближении предложенной феноменологической модели к реальному эхо-сигналу доплеровского лага.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

1. Учет влияния неровностей дна на структуру эхо-сигнала позволил приблизить феноменологическую модель эхо-сигнала к реальному эхо-сигналу лага.
2. Оценка частоты эхо-сигнала и реального сигнала с учетом уровня огибающей эхо-сигнала повышает точность оценки.

3. Увеличение z_{itresh} более 0,3 приводит к значительной потере обрабатываемых данных и незначительно уменьшает среднеквадратичное отклонение результата оценки.

4. Оценка частоты по медиане процесса является более устойчивой по сравнению с оценкой по среднему арифметическому.

5. В то же время оценка частоты по максимуму плотности распределения вероятности (максимум гистограммы) является более устойчивой и обеспечивает меньшую погрешность измерения.

Литература

1. Колчинский В.Е. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / Колчинский В.Е., Мандуровский И.А. - М.: Советское радио, 1975. - 430 с.
2. Гидроакустические навигационные средства / Бородин В.И., Смирнов Г.Е., Толстякова Н.А., Яковлев Г.В. - Л.: Судостроение, 1983. - 264 с.
3. Анализ тонкой структуры эхо-сигнала гидроакустического доплеровского лага : сб. докл. 2-й междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана», 13-14 мая 2008 г. / НТЦ ПАС НАН Украины. - Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 2008. - С. 138-145
4. Оценка частоты эхо-сигнала доплеровского лага при деформации огибающей спектра: сб. докл. 2-й междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана», 13-14 мая 2008 г. / НТЦ ПАС НАН Украины. - Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 2008. - С. 191-203
5. Рассеяние волн статистически неровными поверхностями / Л. В. Шмелев // Успехи физических наук Том 106, вып. 3, 1972 г.
6. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов отраженных от земной поверхности / Зубкович С.Г. - М.: Сов. Радио, 1968. - 224 с.
7. Теория и техника радиолокации : Сб. статей / Под ред. А.Г. Сайбея. - М.: Машиностроение, 1966
8. Бреховских Л.М. Теоретические основы акустики океана / Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 264 с.
9. Теория звука : в 2-х томах / Стретт Дж.В. (Лорд Рэлей) [Перевод с англ., изд. 2-е; под ред. Рытова С.М.] - М.: Гостехиздат, 1955. - Т. 2. - 474 с.
10. Басс Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Басс Ф.Г., Фукс И.М. - М.: Наука, 1972. - 424 с.
11. Доплеровский измеритель скорости L-96 : труды седьмой междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 8-10 июня 2004 г. - Санкт-Петербург: ФГУП «ЦНИИ «Морфизприбор», 2004 - С. 153-157

Стаття надійшла до редакції 23 березня 2011 р. російською мовою

© А.П. Мартинюк

ДИСКРЕТНА МОДЕЛЬ ЭХО-СИГНАЛА ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЛАГА

Розглянуто модель ехо-сигналу доплерівського лагу, що враховує механізм формування та вплив структури нерівностей дна. Виконано аналіз та встановлено зв'язок динаміки модуля аналітичного сигналу та миттєвої частоти. Підтверджено адекватність моделі реальним сигналам доплерівського лагу.

© Anatoliy P. Martynyuk

A DISCRETE MODEL OF THE ECHO-SIGNAL DOPPLER LAG

The model of echo Doppler lag, taking into account the mechanism of formation and the influence of the structure of the irregularities of the bottom. The analysis and a connection is established dynamics of the module and the instantaneous frequency. Confirmed the adequacy of the model the real signal Doppler lag.