

## Раздел I. Радиотехника, измерения, акустика

УДК 621.396.96

**В.Т. Лобач**

### ПОГРЕШНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ МОРСКИХ ВОЛН

*В известных работах показано, что средний период временных флуктуаций комплексной амплитуды отраженного от взволнованной морской поверхности радиолокационного сигнала декаметрового диапазона функционально связан со средней длиной морских волн (СДМВ) в произвольном направлении перемещения приемопередатчика  $\Psi$ . В работе показано, что среди систематических и случайных составляющих погрешности измерения СДМВ преобладают погрешности, обусловленные конечным временем усреднения и конечной шириной диаграммы направленности антенны (ДНА). При времени усреднения 40 с, углах крена и тангажа меньше  $\pm 10^\circ$ , ширине ДНА  $\theta_a \geq 120^\circ$ , средней скорости полета носителя более 100 м/с, суммарная относительная погрешность измерения СДМВ не превышает 10 %.*

*Средняя длина морских волн; погрешность; радиолокационный сигнал; декаметровый диапазон; летательный аппарат.*

**V.T. Lobach**

### LAPSE OF RADAR-TRACKING MEASUREMENT OF LENGTH OF SEA WAVES

*In known works it is shown, that the average period of time fluctuations of complex amplitude of the reflected from the agitated sea surface of a radar signal of a decameter range is functionally coupled to an average length of sea waves (ALSW) in an any direction of relocating of the transceiver  $\Psi$ . It is in-process shown, that among regular and casual component measuring error ALSW the lapses caused by a final time of averaging and final width directional patterns (WDP) predominate. At a time of averaging 40сек., angle of bank and a pitch it is less  $\pm 10^\circ$ , an antenna pattern width  $\theta_a \geq 120^\circ$ , average rate of flight of the carrying agent more 100 м/с, the total relative error of measurement ALSW does not exceed 10 %.*

*An average length of sea waves; a lapse; a radar signal; a decameter range; the aircraft.*

Согласно приведенным в работе [1] результатам, комплексная амплитуда отраженного от взволнованной морской поверхности радиолокационного сигнала декаметрового диапазона может быть определена в рамках метода малых возмущений. При широкой ДНА, энергетический спектр комплексной амплитуды отраженного от взволнованной морской поверхности радиолокационного сигнала  $S_{KA}(\Omega)$  с точно-

стью до постоянного множителя повторяет одномерный пространственный энергетический спектр (ЭС) волнового профиля морской поверхности (МП)  $S_{h\Psi}(p_\Psi)$  в направлении полета  $\Psi$  летательного аппарата (ЛА). При этом средний период временных флуктуаций комплексной амплитуды отраженного от взволнованной МП радиолокационного сигнала  $\bar{T}_C$  определяется выражением [2]:

$$\bar{T}_c = \frac{1}{N^0} = 2\pi \frac{\left[ \int_0^\infty S_{KA}(\Omega) d\Omega \right]^{0.5}}{\left[ \int_0^\infty \Omega^2 S_{KA}(\Omega) d\Omega \right]^{0.5}} = 2\pi \frac{\left[ \int_0^\infty S_{h\Psi}(p_\Psi) dp_\Psi \right]^{0.5}}{\left[ \int_0^\infty V_\Gamma p_\Psi^2 S_{h\Psi}(p_\Psi) dp_\Psi \right]^{0.5}} = \frac{\bar{\Lambda}(\Psi)}{V_\Gamma}, \quad (1)$$

где  $N^0$  – число пересечений среднего уровня в единицу времени;  $\Omega$  – круговая частота флуктуаций комплексной амплитуды отраженного сигнала (ОС);  $V_\Gamma$  – скорость полета ЛА;  $p_\Psi$  – проекция волнового числа  $p$  поверхностной волны на вертикальную плоскость в направлении полета;  $\bar{\Lambda}(\Psi)$  – средняя длина морских волн (МВ) в произвольном направлении  $\Psi$ .

Оценим среднеквадратическое значение (СКЗ) относительной погрешности измерения средней длины морских волн (ДМВ)  $\sigma_{OTH}(\bar{\Lambda})$  по алгоритму измерения (1):

$$\sigma_{OTH}(\bar{\Lambda}) = \sqrt{\sigma_{OTH}^2(\bar{T}) + \sigma_{OTH}^2(V_\Gamma)}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{OTH}(\bar{T})$  – СКЗ относительной погрешности измерения среднего периода  $\bar{T}$ ;  $\sigma_{OTH}(V_\Gamma)$  – СКЗ относительной погрешности измерения скорости полета ЛА  $V_\Gamma$ .

В [3] показано, что для сигнала с корреляционной функцией (КФ) вида  $K(t) = \sigma_c^2 \exp(t/\tau_K) \cos \omega_0 t$ , при большом отношении сигнал/помеха, СКЗ относительной погрешности измерения среднего периода, можно определить из выражения

$$\sigma_{OTH}(\bar{T}) \cong 0,42 \bar{T} \sqrt{\frac{\Delta f_s}{T_-}}, \quad (3)$$

где  $T_-$  – время усреднения при оценке  $\bar{T}$ ;  $\Delta f_s$  – эффективная ширина ЭС ОС.

Учитывая функциональную связь между спектрами сигнала и волнения, а также усредненные опытные данные по волнению разной степени развитости, воспользуемся эмпирическим соотношением [4]  $\Delta f_s = 0,4 N^0 = \frac{0,4}{T}$ . Тогда (3) можем преобразовать к виду

$$\sigma_{OTH}(\bar{T}) = 0,42 \sqrt{\frac{0,4 \bar{T}}{T_y}} = \frac{0,266}{\sqrt{N^0 T_y}}. \quad (4)$$

Согласно экспериментальным исследованиям, выполненным в [5], при средней скорости полета ЛА  $V_\Gamma = (300-400)$  км/ч, ДМВ  $\bar{\Lambda} = (10-90)$  м, величина  $N^0$  находится в пределах (1–10) Гц, а  $\Delta f_s = (0,4-4)$  Гц.

С увеличением скорости полета ЛА, значения величин  $N^0$  и  $\Delta f_s$  пропорционально увеличиваются. Из (4) следует, что при  $T_- = 40$  с СКЗ относительной погрешности оценки  $\bar{T}$  в наихудших (в смысле точности измерения  $\bar{\Lambda}$ ) условиях, имеющих место при измерении максимальных ДМВ, составляет  $\sigma_{OTH}(\bar{T}) = 4\%$ . Сохранение на неизменном уровне погрешности  $\sigma_{OTH}(\bar{T})$  при увеличении скорости

$V_G$  позволяет пропорционально уменьшить время усреднения  $T_-$ . Это эквивалентно неизменности протяженности зачетного участка на МП  $D = T_y V_G$ . Так, при  $T_- = 40$  с,  $V_G = 100$  м/с получим  $D = 4$  км. СКЗ относительной погрешности измерения скорости полета ЛА с помощью доплеровских измерителей, на участке усреднения протяженностью 4 км не превышает 1 %. Учитывая некоррелированность оценок  $\bar{T}$  и  $V_G$  из (2), получим  $\sigma_{отн}(\bar{\Lambda}) = 4,2 \%$ .

Алгоритм измерения  $\bar{\Lambda}$  (1) получен в предположении, что МП неподвижна («замороженная»). В действительности МВ перемещаются с фазовой скоростью  $C_6$ , что при конечной скорости полета ЛА приводит к изменению фазовой скорости поверхностных волн в подвижной системе координат. Это, в свою очередь, приводит к погрешности вычисления ЭС МВ и ЭС. В работе [6] показано, что эта погрешность максимальна, при  $\Lambda \rightarrow \infty$ . Если скорость полета ЛА удовлетворяет требованию  $V_0 \geq 8,2\sqrt{gH_{3\%}}$ , то относительная погрешность оценки ЭС МВ оценивается величиной  $\Delta_{мгн}(S_h) = \frac{\epsilon}{V_0}$ . Здесь  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $a=1$  м/с. Из последнего равенства следует, что при скорости полета ЛА  $V_G=100$  м/с, погрешность оценки ЭС амплитуды сигнала, а следовательно, и погрешность оценки  $\bar{\Lambda}$ , обусловленная принятием гипотезы неподвижности МП, не превышает 1 %.

Для оценки влияния аддитивной помехи на погрешность измерения ДМВ будем полагать, что сигнал и помеха на входе измерителя средней частоты представляют нормальные случайные процессы с известными дисперсиями  $\sigma_c^2$  и  $\sigma_n^2$ . КФ сигнала  $K(t) = \sigma_c^2 \exp(t/\tau_K) \cos \omega_0 t$ , а помехи  $K_n(t) = \sigma_n^2 \exp(-t^2/\tau_{кп}^2)$ . СКЗ относительной погрешности измерения  $\bar{T}$  имеет вид [3]:

$$\sigma_{отн}(\bar{T}) = 1 - \sqrt{\frac{q^2 N_0^2 + \Delta f_3^2}{N_0^2 (1 + q^2)}},$$

где  $q$  – отношение сигнал/помеха.

При

$$q \gg 1 \quad \sigma_{отн}(\bar{T}) = \frac{1}{2q^2} - \frac{\Delta f_3^2}{2N_0^2 q^2}. \quad (5)$$

В условиях, когда  $\Delta f_3 \leq 20$  Гц легко выполняется условие  $q > 10^3$ . Как следует из (5), при таких значениях  $q$  мешающим воздействием помех можем пренебречь. При произвольном соотношении между шириной ДНА и диаграммой обратного рассеяния ДМВ можно определить по формуле

$$\tilde{\Lambda}(\Psi) = \bar{\Lambda}(\Psi) \left( 1 + \frac{2,6\theta_a^2 + 5,5 - 2,8\theta_a^2 k^2 \sigma_h^2}{\theta_a^2 l_{hx}^2 k^2} \right) = \frac{V_G}{N^0}, \quad (6)$$

где  $\theta_a$  – ширина ДНА;  $l_{hx}$  – радиус корреляции МП;  $\sigma_h^2$  – дисперсия ординат МП;  $k$  – волновое число.

Из (6) получим выражение для относительной ошибки смещения

$$\Delta_{отн}(\bar{\Lambda}) = \frac{\tilde{\Lambda}(\Psi)}{\bar{\Lambda}(\Psi)} - 1 = \frac{2,6\theta_a^2 + 5,5 - 2,8\theta_a^2 k^2 \sigma_h^2}{\theta_a^2 l_{hx}^2 k^2}. \quad (7)$$

Из (7) видно, что ошибка смещения  $\Delta_{отн}(\bar{\Lambda})$  положительная, т.е. при конечной ширине ДНА измеренные значения средней ДМВ превышают истинные ее значения. Погрешность увеличивается с уменьшением измеряемых ДМВ, что обусловлено ослаблением высокочастотных составляющих спектра ООС. Это ослабление вносится пространственным фильтром РЛС. Введение в спектр ООС частотных предискажений вида

$$K(\Omega) = \left( \frac{4k^2 V_o^2}{4k^2 V_o^2 - \Omega^2} \right)^{1.5}$$

снижает относительную ошибку смещения

$$\Delta_{отнК}(\bar{\Lambda}) = \frac{5,5 + 0,5\theta_a^2 k^2 \sigma_a^2}{\theta_a^2 l_{hx}^2 k^2}. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены графические зависимости, иллюстрирующие зависимость  $\Delta_{отнК}(\bar{\Lambda})$  от  $\bar{\Lambda}$  при различных значениях  $\theta_a$  и  $\sigma_h$ .

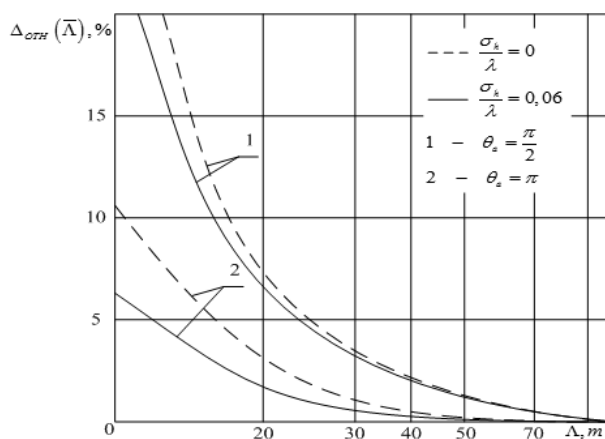


Рис. 1

Уменьшив в (6) параметр  $V_r/N_0$  путем умножения его на коэффициент  $K_\Lambda = 0,93$ , погрешность измерения во всем диапазоне длин ( $\bar{\Lambda} = 10-100$  м) и высот ( $H_{3\%} = 0,05-3,5$  м) МВ, при  $\theta_a = 120^\circ$ , можно уменьшить до величины  $\Lambda_{мГнж} = (6-8) \%$ . При широкой ДНА, относительная погрешность измерения  $\bar{\Lambda}$ , обусловленная креном (тангажем) ЛА  $\beta_0$ , равна

$$\Delta_{отн}(\bar{\Lambda}) = \cos \beta_0 - 1. \quad (9)$$

При  $\beta_0 \leq \pm 10^\circ$  смещенность оценки  $\bar{\Lambda}$  не превышает 1,5 %. Поскольку пилотирование ЛА в стационарных условиях горизонтального полета с углами крена (тангажа)  $\pm 2^\circ$  является выполнимой задачей, то рассматриваемой составляющей погрешности (9) можно пренебречь. При отсутствии корреляционных связей между рассмотренными выше составляющими, СКЗ относительной погрешности измерения средней ДМВ  $\delta(\bar{\Lambda})$  определится из выражения

$$\delta(\bar{\Lambda}) = \sum_{i=1}^m \Delta_{OTN_i} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{OTN_i}^2},$$

где  $\Delta_{OTN_i}$  – систематические и  $\sigma_{OTN_i}^2$  – случайные составляющие погрешности.

Основываясь на приведенных выше результатах, можно сказать, что погрешности, обусловленные конечным временем усреднения и конечной шириной ДНА, преобладают в суммарной погрешности.

При выполнении сформулированных выше требований к времени усреднения ( $T_y=40$  с), допустимым значением углов крена и тангажа ( $\beta_0 \leq \pm 10^\circ$ ), ширине ДНА ( $\theta_a \geq 120^\circ$ ), средней скорости полета ЛА  $V_r \geq 100$  м/с, суммарная относительная погрешность измерения  $\bar{\Lambda}$  не превышает 10 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобач В.Т. Статистические характеристики радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности. – М.: Радио и связь, 2006. – 250 с.
2. Лобач В.Т. Радиолокационное измерение длины морских волн // Известия вузов «Электромеханика». Спец. выпуск «Радиоэлектронные устройства и системы». – 2005. – С. 10-14.
3. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. – М.: Советское радио, 1975. – 430 с.
4. Луговский В.В. Динамика моря // Судостроение. – Л., 1976. – С. 200.
5. Лобач В.Т. Исследование статистических характеристик радиосигналов, отраженных от морской поверхности, и методов измерения параметров морского волнения с летательного аппарата: Дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1974. – 217 с.
6. Небылов А.В. Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. – СПб.: СПбГААП, 1994. – 307 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

**Лобач Владимир Тихонович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: RTS@TTL.SFEDU.RU; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. тел.: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Lobach Vladimir Tikhonovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ugenie@tumoyan.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.6+681.3

**С.В. Николаев**

#### **О ВОССТАНОВЛЕНИИ НЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО ДВУМ СОСЕДНИМ ОТСЧЕТАМ**

*Рассмотрен процесс восстановления непрерывных сигналов после их равномерной дискретизации путем кусочной интерполяции по двум соседним отсчетам. В качестве априорной информации об исходном сигнале используются его динамические характеристики – предельные значения n-й производной сигнала. В отличие от классической интерполяции степенными полиномами рассматриваемый способ восстановления требует только два соседних отсчета, независимо от порядка n известных динамических характе-*