

УДК 621.396.967.15

В.В. Челпанов, А.В. Челпанов, О.Я. Луковський

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НАД МОРЕМ

Рассматривается влияние среды РРВ на информативные параметры сигналов, в частности, амплитуду, фазу и их корреляционные свойства. Оцениваются ошибки измерений координат целей в радиолокационных станциях (РЛС) приморского базирования, в условиях рефракции радиоволн, по отражениям от эталонных объектов (реперов), которые имеют место при наличии тропосферных волноводов. Рассматриваются возможности компенсации этих ошибок для повышения точности оценок параметров траектории сопровождаемой цели в условиях влияния среды распространения радиоволн на приморском направлении.

**Ключевые слова:** ошибки измерений, распространение радиоволн, тропосферный волновод, компенсация ошибок.

### Вступление

**Постановка проблемы, анализ последних исследований и публикаций.** В РЛС приморского базирования на точность измерения координат воздушных целей в значительной степени влияют условия распространения радиоволн (РРВ), в частности, наличие тропосферных волноводов (ТВВ), как приповерхностных (приводных), так и приподнятых [1]. Определение и учёт ошибок измерений может быть проведено с использованием контрольных целей или эталонных объектов с известными характеристиками (координатами) [2]. При значительной рефракции радиоволн, когда они распространяются в пределах ТВВ, имеют место отражения от поверхностно-распределённых объектов (ПРО), например, от противоположной береговой черты [3].

Параметры и координаты характерных элементов ПРО достаточно хорошо известны и поэтому такие объекты могут рассматриваться как эталонные, а эхо-сигналы от них использоваться для оценки ошибок измерений и соответствующей коррекции результатов измерений и уточнения параметров траекторий сопровождаемых целей [2, 4].

**Цель статьи.** Рассмотреть возможности использования отражений от объектов с известными параметрами при распространении радиоволн в пределах ТВВ для оценки ошибок измерений и методики уточнения результатов первичной и вторичной обработки радиолокационной информации.

### Основная часть

При обнаружении и измерении параметров движения воздушных целей в РЛС приморского базирования следует учитывать возможную рефракцию радиоволн и, соответственно, значительное увеличение ошибок измерения координат.

Влияние среды РРВ (приводного слоя) определяется структурой коэффициента преломления  $n$ ,

которая зависит от температуры, давления и влажности воздуха в приводном слое [1].

Слоистые неоднородности параметра  $n$  приводят к образованию ТВВ и рефракции радиоволн.

Изменение условий РРВ за счёт неоднородных областей  $n$  вызывает как флуктуационные (быстроменяющиеся), так и систематические (медленноменяющиеся) ошибки измерений координат и параметров движения целей.

Для повышения точности получаемой радиолокационной информации могут быть использованы измерения по эталонным объектам (реперам). В случае волноводного РРВ над морем в качестве эталонных можно использовать отражения от ПРО с известными координатами, в частности, от элементов противоположной береговой черты или возвышенностей за её пределами.

Для этого необходимо составлять карту пассивных помех от местных предметов (ПРО) с оценкой их координат.

В процессе обзора пространства по заданному алгоритму выделяются сигналы от реперов с измерением их информативных параметров, в частности, значений координат. При этом осуществляется оценка составляющих ошибок измерений – быстроменяющихся (БМО) и медленноменяющихся (ММО).

Рассмотрим методику оценки БМО.

Ошибку измерения координаты эталонного объекта (репера)  $v_{zi}$  будем считать аддитивной:

$$v_{zi} = y_i - x_i, \quad (1)$$

где  $y_i$  – результат измерения координаты репера в  $i$ -том такте работы РЛС;  $x_i$  – известное значение координаты репера.

Для БМО оценка корреляционной функции по дискретной во времени реализации ошибок измерений  $v(t_i)$  с периодом  $T = t_i - t_{i-1}$  осуществляется следующим образом [2]:

$$K(\tau_m) = \frac{1}{n-m-1} \sum_{i=1}^{n-m} \{ [v(t_i + \tau_m) - \bar{v}] \cdot [v(t_i) - \bar{v}] \}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество тактов одного цикла измерений;  
 $\tau_m$  – аргумент корреляционной функции, изменяющийся в пределах  $(0, \Delta\tau)$ ;

$\Delta\tau$  – время накопления измерений;

$\bar{v}$  – среднее значение ошибки измерения;

$$n = \frac{\Delta\tau}{T}; \quad \tau_m = m \cdot T; \quad \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v(t_i).$$

Нормированная корреляционная функция:

$$K_H(\tau_m) = \frac{1}{\sigma_{vB}^2} \cdot K(\tau_m); \quad (3)$$

где  $\sigma_{vB}^2$  – оценка дисперсии ошибки измерения (БМО);

$$\sigma_{vB}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v(t_i) - \bar{v})^2. \quad (4)$$

Интервал корреляции:

$$\tau_k = \int_0^{\infty} K_H(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Оценка ММО измерений координат осуществляется по реализации, полученной за время сопровождения цели  $\tau_c$ . Для этого используется полученная последовательность ошибок  $v_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – число циклов сопровождения, на выходе фильтра низких частот с полосой пропускания  $\Delta f_{гр}$ , определяемой эффективной полосой спектра БМО. Тогда дисперсия ММО определится как

$$\sigma_{vB}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N v_j^2. \quad (6)$$

Дисперсия полной ошибки определяется путём суммирования (4) и (6):

$$\sigma_{v\Sigma}^2 = \sigma_{vB}^2 + \sigma_{vM}^2. \quad (7)$$

Рассмотрим влияние среды РРВ на информативные параметры радиолокационных сигналов, в частности, амплитуду, фазу и их корреляционные свойства.

Среда РРВ над морем может быть представлена в виде двух основных моделей – гауссовской и колмогоровской (локально-изотопной турбулентности).

Одним из основных показателей, определяющих значения флуктуаций параметров сигналов, является волновой параметр  $\tau$ :

$$\tau = \frac{2L\lambda}{\pi a^2},$$

где  $L$  – длина трассы РРВ;

$\lambda$  – длина волны;

$k$  – волновое число;

$k = 2\pi/\lambda$ ;

$a$  – средний размер неоднородности (определяет значение пространственного радиуса корреляции коэффициента преломления  $r_0$ ).

Как правило, выполняется условие  $L \gg 1$  и  $\tau \gg 1$ . При этом дисперсия флуктуаций амплитуды  $\sigma_\chi^2$  и фазы  $\sigma_\phi^2$  определяются следующим образом [1]:

$$\sigma_\chi^2 = \sqrt{\pi} \cdot \overline{\delta n^2} \cdot r_0 \cdot L \cdot k^2;$$

$$\sigma_\phi^2 = \frac{1}{2} \sigma_\chi^2,$$

где  $\chi$  – уровень сигнала (логарифм относительного значения амплитуды);

$$\chi = \ln \frac{A(R)}{A_0},$$

$A_0$  – амплитуда сигнала точечного излучателя на расстоянии  $R$  без учёта флуктуаций.

Коэффициент поперечной корреляции амплитуды и фазы при этом определяется, как:

$$R(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{r_0^2}\right),$$

где  $\rho$  – расстояние между точками анализа в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (в частности, по раскрытию антенны).

Коэффициент продольной корреляции амплитуды и фазы:

$$R(\rho) = \frac{1}{1 + 2\rho / (ka^2)},$$

где  $\rho$  – расстояние между точками по направлению РРВ (соответствует временному параметру).

Рассмотрим порядок оценки ошибок измерений координат целей за счет изменения параметров среды РРВ и их использования для уточнения единичных измерений (параметров отметок) и параметров траектории сопровождаемых целей.

Оценка ошибок измерений координат за счет влияния среды РРВ над морем может проводиться периодически и уточняться в процессе сопровождения целей. Периодичность оценки определяется стабильностью параметров среды РРВ.

В ходе сопровождения целей измеренные значения их координат уточняются замерами по эталонным объектам (реперам), в результате получим оценки координат в  $j$ -том цикле сопровождения:

$$\hat{x}_{ji} = y_{ji} - v_{\phi ji}, \quad (8)$$

где  $v_{\phi ji}$  определяется в соответствии с (1).

Если проводится серия из  $n$  измерений по цели и реперу, оценка координаты цели формируется как результат усреднения [5]:

$$\hat{x}_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{ji} - v_{\phi ji}). \quad (9)$$

В результате дисперсия ошибки измерения координаты цели определится как:

$$\sigma_{\hat{x}}^2 = \frac{2\sigma_x^2}{n} \left[ 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n-1} r_{ij}(2n-1)(-1)^i \right], \quad (10)$$

где  $r_{ij}$  – нормированный коэффициент корреляции между измерениями координаты цели и репера;

$$r_{ij} = \frac{1}{\sigma_v^2} K_{ij} = \exp(-\alpha \tau_i);$$

$$\alpha = \frac{1}{T_0}, \text{ где } T_0 \text{ – интервал корреляции;}$$

$\tau_i$  – пространственный разнос по измеряемому параметру (дальности или угловой координате) между сопровождаемой целью и репером.

Далее измеренные и уточненные значения координат целей (отметки обнаружения или опорные точки сопровождения) поступают на вторичную обработку, где фильтруются с оценкой параметров траектории. В частности, для фильтра Калмана в одномерном случае рекуррентная оценка соответствующего параметра траектории цели в  $j$ -том цикле сопровождения  $\hat{x}_{trj}$  определится как [4]:

$$\hat{x}_{trj} = x_{эj} + K_{усj} (\hat{x}_j - x_{эj}), \quad (11)$$

где  $\hat{x}_j$ ,  $x_{эj}$  – соответственно измеренное и экстраполированное значения параметра;

$K_{усj}$  – коэффициент усиления фильтра, значение которого определяется ошибками измерения – дисперсией  $\sigma_x^2$  (7), (10) и ошибками экстраполяции  $\sigma_{хэ}^2$ .

$$K_{усj} = \frac{\sigma_{хэ}^2}{\sigma_{хэ}^2 + \sigma_x^2}. \quad (12)$$

При этом используются значения корреляционной матрицы ошибок (в данном случае дисперсии  $\sigma_x^2$ ), полученные по сигналам от эталонных объектов.

## Выводы

Получение и учёт статистических данных об ошибках измерений координат целей по сигналам от эталонных объектов позволяет скомпенсировать ошибки единичных измерений и повысить точность оценки параметров траектории сопровождаемой цели в условиях влияния среды распространения радиоволн на приморском направлении.

## Список литературы

1. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
2. Испытания РЛС (оценка характеристик) / Под ред. А.И. Леонова. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
3. Експериментальне дослідження параметрів тропосферних радіохвильоводів над морем / В.Д. Карлов, Е.В. Лукашук, А.В. Челпанов // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 3(7). – С. 54-57.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
5. Сильвестров С.Д. Структура космических измерительных систем / С.Д. Сильвестров, В.В. Васильев. – М.: Сов. радио, 1979. – 224 с.

Поступила в редколлегию 29.09.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ РЕФРАКЦІЇ РАДІОХВИЛЬ НАД МОРЕМ

В.В. Челпанов, А.В. Челпанов, О.Я. Луковський

Розглядається вплив середовища РРХ на інформативні параметри сигналів, зокрема, амплітуду, фазу і їх кореляційні властивості. Оцінюються помилки вимірювань координат цілей в станціях (РЛС) радіолокацій приморського базування, в умовах рефракції радіохвиль, по віддзеркаленнях від еталонних об'єктів (реперів), які мають місце за наявності тропосферних хвильоводів. Розглядаються можливості компенсації цих помилок для підвищення точності оцінок параметрів траєкторії супроводжуваної цілі в умовах впливу середовища розповсюдження радіохвиль на приморському напрямі.

**Ключові слова:** помилки вимірювань, розповсюдження радіохвиль, тропосферний хвильовід, компенсація помилок.

## POSSIBILITIES OF INCREASE OF EXACTNESS OF TRAJECTORY MEASUREMENTS AT REFRACTION OF RADIO WAVES ABOVE SEA

V.V. Chelpanov, A.V. Chelpanov, O.Ya. Lukovskiy

Influence of environment of RRV is examined on the informing parameters of signals, in particular, amplitude, phase and their cross-correlation properties. The errors of measurements of co-ordinates of aims are estimated in the radio-location stations (radar) of the seashore basing, in the conditions of refraction of radio waves, on reflections from standard objects (penepov) which take a place at presence of troposphere waveguidees. Possibilities of indemnification of these errors are examined for the increase of exactness of estimations of parameters of trajectory of the accompanied purpose in the conditions of influence of environment of distribution of radio waves on seashore direction.

**Keywords:** errors of measurements, distribution of radio waves, troposphere waveguide, indemnification of errors.