

УДК 681.396.96: 681.32

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, Н.Н. Петрушенко<sup>2</sup>, В.В. Челпанов<sup>1</sup>, К.П. Квиткин<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница

## ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ПРИМОРСКОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

Рассматривается степень влияния неоднородностей среды распространения радиоволн (РРВ) на информативные параметры радиолокационных сигналов при измерении азимутального положения целей, в частности, на амплитудные, фазовые и спектральные характеристики эхо-сигналов.

**Ключевые слова:** тропосферный волновод, распространение радиоволн, флуктуации параметров радиолокационных сигналов.

### Введение

**Постановка проблемы, анализ литературы:** при работе РЛС приморского базирования имеет место значительное влияние среды РРВ на эффективность её функционирования, в частности на дальность обнаружения и точностные характеристики при измерении координат [1]. Возникающие слоистые неоднородности коэффициента преломления среды РРВ над морем вызывают появление тропосферного волновода (ТВВ), который захватывает часть энергии зондирующего сигнала и позволяет обнаруживать маловысотные цели за линией горизонта [2]. В то же время необходимо учитывать искажения информативных параметров сигналов, которые могут привести к значительным ошибкам в измерении параметров движения целей, в первую очередь угловых координат [3, 4].

**Цель статьи:** оценить влияние неоднородностей среды РРВ на точность измерения азимута цели и рассмотреть возможность по учету и коррекции ошибок измерений угловых координат.

### Основная часть

На работу РЛС на приморском направлении значительное влияние оказывают условия РРВ. В частности, над поверхностью моря возникают неоднородности (турбулентности) среды РРВ, вызванные изменением температуры, влажности и давления, которые вызывают неоднородности коэффициента преломления  $n$  и индекса преломления  $N$ . Имеют место как крупномасштабные, так и мелко-масштабные неоднородности.

Характерным является слоистый характер их структуры, который достаточно хорошо описывается профилем индекса рефракции по высоте  $h$  ( $M$  – профилем  $M(h)$ ):

$$M_{(h)} = N_{(h)} + \frac{h}{R_3} \cdot 10^6 = \left( n - 1 + \frac{h}{R_3} \right) \cdot 10^6. \quad (1)$$

Следует отметить, что при  $\frac{dM_{(h)}}{dh} \leq 0$  образует-

ся тропосферный волновод.

Неоднородности среды можно представить двумя основными моделями – гауссовской (изотропная турбулентность тропосферы) и колмогоровской (локально-изотропная турбулентность).

Неоднородность среды вызывает флуктуации информативных параметров радиолокационных сигналов и может в значительной степени повлиять на дальность обнаружения целей и на точность измерения параметров их движения, в частности, текущих значений дальности и угловых координат.

Более подробно рассмотрим влияние среды РРВ на точность измерения азимутальной координаты.

Информативными параметрами при измерении азимута цели могут быть амплитуда (огигающая) радиолокационного сигнала, частота, фаза и спектральные характеристики.

Рассмотрим влияние среды РРВ на точность измерения азимута на примере РЛС дальнего обнаружения (ДО) 5Н86 [5].

В режиме обнаружения азимут цели определяется как средневзвешенное значение азимута диаграммы направленности (ДН)  $\beta_i$  в  $m$  соседних тактах работы РЛС, в которых получены импульсы обнаружения:

$$\beta_{\text{ц}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m S_i} \sum_{i=1}^m S_i \beta_i,$$

где  $\beta_i$  – азимутальное положение ДН в  $i$ -ом такте работы РЛС;  $S_i$  – вес (площадь) импульса обнаружения с размерами по дальности  $\Delta R_i$  и радиальной скорости  $\Delta V_i$ ,

$$S_i = \Delta R_i \cdot \Delta V_i.$$

Обзор по азимуту в режиме обнаружения осуществляется частотным методом, ширина ДН

$$\Delta\beta_{0,5P} = 0,5^\circ,$$

дискретность сканирования

$$\Delta\beta = \beta_i - \beta_{i-1} = 0,5^\circ,$$

среднее значение ошибки отсчета азимута (СКО)

$$\sigma_\beta \approx 0,25^\circ,$$

при ошибке дискретности

$$\sigma_d \approx 0,14^\circ.$$

В режиме сопровождения осуществляется уточнение азимутального положения цели в пределах ДН спектральным методом. При этом используется широкополосный сигнал, манипулированный по фазе 127-значной М-последовательностью с длительностью дискреты  $\tau_d = 6,25$  мкс. Ширина спектра сигнала  $\Delta f_c = 160$  кГц.

Уточнение  $\Delta\beta_{\text{ц}}$  осуществляется по соотношению амплитуд сигналов на выходах двух фильтров – верхних и нижних частот  $A_{\text{в}}$ ,  $A_{\text{н}}$  (ФВЧ, ФНЧ) на промежуточной частоте  $f_{\text{пр}}$  (рис. 1):

$$\Delta\beta_y = k \cdot \lg \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}} = k(\lg A_{\text{в}} - \lg A_{\text{н}});$$

$$\beta_{\text{ц}} = \beta_i + \Delta\beta_y.$$

Потенциальная точность уточнения азимута до  $0,15^\circ$ .

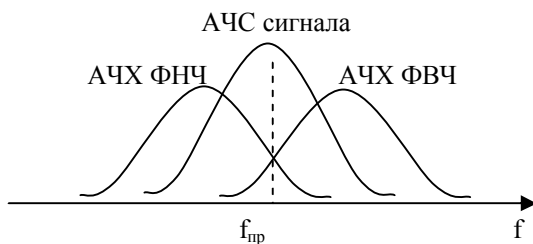


Рис. 1. Спектральные характеристики канала уточнения азимута.

На точность измерения азимута цели оказывают влияние искажения параметров радиолокационных сигналов за счет среды РРВ – амплитуды, фазы, частоты, угла прихода радиоволн.

Угол прихода радиоволн в азимутальной плоскости, как правило, не претерпевает значительных изменений, так как горизонтальный градиент изменения коэффициента преломления среды значительно меньше, чем вертикальный.

По данным [3], рефракция радиоволн в стандартной тропосфере в горизонтальной плоскости составляет величину до  $0,1$  мрад ( $0,06^\circ$ ).

Неоднородности среды РРВ над морем, которые вызывают как мелкомасштабные, так и крупномасштабные неоднородности коэффициента преломления (соответствующие основным моделям среды – гауссовской и колмогоровской) вызывают флуктуации амплитуды, фазы и угла прихода радиолокационных сигналов.

При прохождении неоднородностей среды результат суммирования рассеянных волн будет определяться их фазовыми соотношениями. При этом,

как правило, будет выполняться условие  $\tau \gg 1$ , где  $\tau$  – волновой параметр:

$$\tau = \frac{4L}{ka^2}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина трассы РРВ;  $k$  – волновое число;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $a$  – средний размер неоднородностей (определяет значение пространственного радиуса корреляции  $r_0$ ).

Для  $\tau \gg 1$  значения флуктуаций (дисперсии) амплитуды (уровня) сигнала  $\chi$  могут быть записаны, как [1, 4]:

$$\sigma_\chi^2 = \sqrt{\pi} \cdot \overline{\delta n^2} \cdot r_0 L k^2, \quad (3)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\chi = \ln \frac{A_{(R)}}{A_0}$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $A_0$  – амплитуда сигнала точечного излучателя на расстоянии  $R$  без учета флуктуаций.

При этом имеет место зависимость от длины волны  $\lambda$  (т.е. частоты  $f$ ) сигнала:

$$\sigma_\chi^2 \sim f^2.$$

Для характеристики пространственно-временной когерентности поля волны важным показателем является коэффициент пространственной (поперечной) корреляции амплитудных флуктуаций  $R_\chi(\rho)$  в плоскости  $x = L$  (в плоскости антенны РЛС), который для гауссовской модели среды РРВ и когда размер апертуры антенны мал по сравнению с размерами неоднородности, определяется следующим образом [1]:

$$R_\chi(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{r_0^2}\right), \quad (4)$$

где  $\rho$  – расстояние между точками в плоскости  $x = L$  (по раскрытию антенны);  $r_0$  – радиус корреляции флуктуаций коэффициента преломления  $n$  (соответствует среднему размеру неоднородности).

Фазовые флуктуации при  $\tau \gg 1$  отличаются от амплитуды (3) только постоянным коэффициентом [4]:

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \overline{\delta n^2} k^2 L r_0.$$

Для описания фазовых флуктуаций в данном случае можно использовать первое приближение геометрической оптики.

Радиус поперечной корреляции фазы при  $\tau \gg 1$  совпадает с радиусом поперечной корреляции амплитуды (уровня  $\chi$ ) сигнала (4).

При использовании частотного метода управления положением ДН по азимуту, с изменением частоты сигнала (в пределах  $\sim 8$  МГц) изменяются и значения флуктуаций амплитуды и фазы.

Дисперсия угла прихода радиоволны  $\overline{\delta\alpha^2}$  при значении волнового параметра  $\tau \gg 1$  определится, как [1]:

$$\overline{\delta\alpha^2} = \sqrt{\pi} \cdot \frac{L}{r_0} \overline{\delta n^2}.$$

Следовательно, дисперсия угла прихода волны пропорциональна дисперсии коэффициента преломления  $\overline{\delta n^2}$ , длине трассы РРВ  $L$  и обратно пропорциональна радиусу корреляции коэффициента преломления  $r_0$ .

Флуктуации амплитуды и фазы сигнала влияют на его спектральные характеристики, в частности, спектр сигнала расширяется и деформируется, что в определенной степени увеличивает ошибку измерения азимута в режиме сопровождения цели при использовании спектрального метода уточнения.

Коррекция угла прихода сигнала в азимутальной плоскости может быть проведена с помощью отражений от известных пространственно-распределенных объектов (реперов), расположенных в районе противоположной береговой черты.

Сравнивая измеренное значение азимутального положения таких объектов  $\beta_{\text{изм}j}$  и известное  $\beta_{0j}$  для нескольких ( $j = 1, 2, \dots$ ) азимутальных направлений определяются постоянные составляющие значений рассогласований:

$$\Delta\beta_{\text{ц}} = \beta_{0j} - \beta_{\text{изм}j}.$$

Полученные значения  $\Delta\beta_j$  учитываются в ходе обработки эхо-сигналов от сопровождаемых целей.

Случайные составляющие ошибок измерений азимута могут быть частично скомпенсированы за счет усреднения серии замеров (до  $m = 8$ ), выделяемых в каждом цикле сопровождения:

$$\beta_{\text{ц}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \beta_{\text{ц}i}.$$

## Выводы

Неоднородности среды РРВ над морем, в частности, образование тропосферного волновода, позволяет обнаруживать маловысотные цели за линией горизонта, и, в то же время, приводит к ошибкам измерения угловых координат. На точность измерения азимута цели оказывают влияние искажения информативных параметров сигналов – амплитуды, фазы, спектральных характеристик и угла прихода радиоволны.

Использование эталонных отражателей (поверхностно – распределенных объектов) позволяет учесть некоторые ошибки и скорректировать текущие измерения координат.

## Список литературы

1. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
2. Мисайлов В.Л. Обнаружение маловысотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом / В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. научно-техн. сб. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.
3. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем. / Пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, – 1969. – 620 с.
4. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов. М.: Наука, 1966. – 404 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И.Кожедуба, Харьков.

### ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НА ПРИМОРСЬКОМУ НАПРЯМКУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ КУТОВИХ КООРДИНАТ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЦІЛЕЙ

В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, В.В. Челпанов, К.П. Квіткін

*Розглядається ступінь впливу неоднорідності середовища розповсюдження радіохвиль (РРХ) на інформативні параметри радіолокаційних сигналів при вимірюванні азимутального положення цілей, зокрема, на амплітудні, фазові та спектральні характеристики луна-сигналів.*

**Ключові слова:** тропосферний хвилевод, розповсюдження радіохвиль, флуктуації параметрів радіолокаційних сигналів.

### INFLUENCE OF THE ENVIRONMENT OF DISTRIBUTION OF RADIO-WAVES ON THE SEASIDE DIRECTION AT MEASUREMENT OF ANGULAR COORDINATES OF THE RADAR-TRACKING PURPOSES

V.D. Karlov, N.N. Petrusenko, V.V. Chelpanov, K.P. Kvitkin

*Influence degree heterogeneity environments of distribution of radio-waves on informative parameters of radar-tracking signals is considered at measurement of azimuthal position is more whole, in particular, on peak, phase and spectral characteristics of echo-signals.*

**Keywords:** a tropospheric wave guide, distribution of radio-waves, fluctuations of parameters of radar-tracking signals.