

УДК 681.396.96: 681.32

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, М.М. Петрушенко<sup>2</sup>, В.В. Челпанов<sup>1</sup>, К.П. Квиткин<sup>1</sup><sup>1</sup> Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ МОРСКОГО ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА

Рассматривается возможность определения комплексного параметра, характеризующего степень захвата энергии радиолокационного сигнала морским тропосферным волноводом. Для этого используются отражения от поверхностно-распределенных объектов с известными характеристиками (ЭПР), находящиеся на трассе распространения радиоволн. Предложена методика оценки дальности обнаружения маловысотных целей, находящихся в пределах приповерхностного и приподнятого тропосферного волновода.

**Ключевые слова:** тропосферный волновод, распространение радиоволн, эффективная поверхность рассеяния, дальность обнаружения цели.

### Введение

**Постановка проблемы, анализ литературы:** в нормальных условиях распространения радиоволн (РРВ) дальность радиолокационного обнаружения маловысотных воздушных целей ограничивается дальностью прямой видимости.

Для РЛС на приморском направлении следует учитывать возможность возникновения тропосферного волновода (ТВВ) как приповерхностного (приводного), так и приподнятого, который захватывает часть энергии зондирующего сигнала, и за счет критической и сверхрефракции радиоволн появляется возможность обнаружения целей за пределами радиогоризонта.

В связи с этим есть необходимость определения наличия ТВВ, оценки его параметров, в частности, степени захвата энергии сигнала и возможностей по обнаружению маловысотных целей за пределами радиогоризонта.

Возможность и условия образования ТВВ над морской поверхностью рассмотрены в [1]. Описание моделей ТВВ над морем на основе анализа параметров преломления среды РРВ проведено в [2]. Возможности и характеристики обнаружения маловысотных целей на загоризонтных дальностях в условиях существования ТВВ рассмотрены в [3, 4].

**Цель статьи:** рассмотреть возможность установления факта наличия тропосферного волновода и методику оценки дальности обнаружения маловысотных целей на основе анализа параметров эхосигналов от известных поверхностно-распределенных объектов (ПРО) – реперов, находящихся за пределами радиогоризонта.

### Основная часть

Свойства среды РРВ характеризуются различными параметрами, в частности, коэффициентом преломления  $n$ , приведенным коэффициентом пре-

ломления  $N$  и модифицированным индексом преломления  $M$  [1]:

$$M_z = N_z + 10^6 \frac{Z}{a_3}, \quad (1)$$

где  $Z$  – высота над уровнем моря;  $a_3 = 6371$  км (радиус Земли).

В соответствии с видом  $M$ -профиля проводится классификация условий РРВ. В частности, если в интервале высот  $\Delta Z$  имеется область, где  $\frac{dM}{dZ} < 0$ , то в этой области образуется волновод – приповерхностный или приподнятый. Интенсивность ТВВ определяется величиной  $\Delta M$ , а толщина слоя – величиной  $\Delta Z$ , в пределах которой  $\frac{dM}{dZ} < 0$ .

Толщина ТВВ составляет величину до 200 м, а высота приподнятого – до 3-х км [2].

Прямой расчет параметров ТВВ и степени захвата энергии сигнала по параметрам среды на трассе РРВ является весьма громоздким и требует наличия системы датчиков (в частности, измерителей диэлектрической проницаемости, давления, температуры, влажности воздуха).

В тоже время в реальных условиях функционирования РЛС имеется ряд признаков и параметров эхосигналов, по которым можно судить о наличии тропосферного волновода и возможности обнаружения маловысотных целей за пределами радиогоризонта.

Такая возможность появляется, если на трассе РРВ имеются реперы – поверхностно-распределенные объекты с известными характеристиками по их высоте над уровнем моря, дальности  $R_n$  и величине эффективной поверхности рассеяния (ЭПР)  $\sigma_n$ .

В акватории Черного моря такие объекты составляют противоположную береговую линию и находятся на расстоянии 300...450 км, а также к ним

относится горный массив за береговой линией высотой до 2...3 км.

Наличие достаточно мощных эхо-сигналов, временная задержка которых соответствует дальности до береговой черты или возвышенностей на определенном расстоянии от неё, свидетельствует о существовании ТВВ.

Если сигнал наблюдается на всех азимутах (в том числе от относительно низкого берега), тропосферный волновод является приповерхностным (приводным), если от возвышенностей – приподнятым.

Возможность определения наличия ТВВ и методику оценки дальности обнаружения маловысотных целей за пределами радиогоризонта рассмотрим на примере РЛС дальнего обнаружения (ДО) приморского базирования типа 5Н86.

Для этого целесообразно использовать режим обнаружения РЛС с использованием узкополосного сигнала, в котором обзор по азимуту в секторе  $\Delta\beta = 30^\circ \cdot 4 = 120^\circ$  и углу места  $\Delta\varepsilon = 30^\circ$  осуществляется по жесткой программе.

Параметры диаграммы направленности (ДН) двухканальной по углу места антенны РЛС в азимутальной ( $\beta$ ) и угломестной ( $\varepsilon$ ) плоскости приведены на рис. 1, а, б.

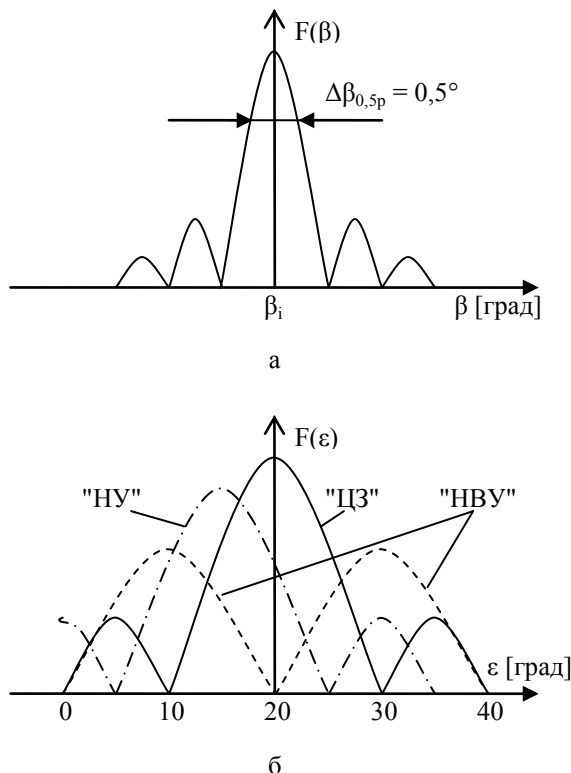


Рис. 1. Параметры ДН в азимутальной (а) и угломестной (б) плоскости

Здесь по углу места могут формироваться три основных типа ДН – "центральная зона (ЦЗ)" при синфазной запитке верхнего и нижнего антенно-волноводного тракта (АВТ) –  $\Delta\phi_\phi = 0$ ; "нижние и

верхние углы (НВУ)" – при противофазной запитке  $\Delta\phi_\phi = \pi$ , и "нижние углы (НУ)" – при  $\Delta\phi_\phi = \pi/2$ .

При наличии ТВВ степень захвата энергии зондирующего сигнала будет определяться углом места, под которым идет излучение, расстоянием от РЛС до береговой черты  $L_6$  и толщиной и видом ТВВ. В данном случае расстояние  $L_6$  составляет величину порядка сотен метров.

Поэтому, в зависимости от типа ДН по углу места, ТВВ захватывает в основном энергию первого (нижнего) бокового лепестка (режим "ЦЗ") и часть энергии основного луча ДН (режимы "НВУ" и "НУ").

Просмотр по азимуту может осуществляться с дискретностью, соответствующей ширине ДН  $\Delta\beta_{0.5p} = 0.5$  – всего до 256 азимутальных направлений одним типом ДН по углу места.

В ходе обзора осуществляется измерение "веса" (амплитуды) эхо-сигнала, если он превысил порог, с временной задержкой, соответствующей дальности до ПРО.

Если ТВВ приводный, при его запитке эхо-сигнал будет от всей береговой черты, а если приподнятый – то от возвышенностей за пределами береговой черты.

Параметры рельефа береговой черты и местности на каждом азимутальном направлении  $\beta_i$  можно оценить заранее, в частности, величину ЭПР  $\sigma_{pi}$  для приводного и приподнятого ТВВ.

По результатам обзора составляется карта пассивных помех в пределах сектора обзора по азимуту с определением амплитудных характеристик и времени задержки сигналов (то есть дальности до ПРО  $R_{pi}$ ).

Зная параметры зондирующих сигналов (импульсную мощность  $P$ , длину волны  $\lambda$ ) и параметры ДН РЛС, а также ЭПР цели, определив параметры ТВВ (в частности, степень его запитки), можно оценить мощность эхо-сигнала на входе приемника РЛС, то есть возможность обнаружения маловысотной цели, находящейся за пределами радиогоризонта.

Однако измерение параметров ТВВ, а именно, его мощности (толщины)  $H_{вв}$ , множителя потерь  $V_{вв}$  и коэффициента  $\gamma_{вв}$ , показывающего степень захвата мощности зондирующего сигнала волноводом, требует наличия соответствующих измерителей параметров среды РРВ и представляет значительную сложность в реализации.

В то же время комплексная оценка параметров ТВВ может быть проведена на основе анализа параметров эхо-сигналов от эталонных ПРО с известными параметрами по дальности и ЭПР (от реперов). Поэтому далее рассмотрим методику оценки комплексных параметров ТВВ, учитывающего степень захвата мощности радиолокационного сигнала и возможные ее потери на трассе РРВ, с использованием параметров отражений от ПРО, и, соответ-

венно, возможность загоризонтного обнаружения маловысотных целей.

Плотность потока мощности, создаваемая РЛС в точке нахождения ПРО (или цели) с ЭПР  $\sigma_{\Pi}$  (или  $\sigma_{\Pi}$ ), на дальности  $R_{\Pi}$  (или  $R_{\Pi}$ ) на некотором азимутальном направлении  $\beta_i$  будет равна [3]:

$$S_{\Pi} = \frac{P_{\text{пер}} G}{2\pi R_{\Pi}} \cdot \frac{\gamma_{\text{ВВ}} V_{\text{ВВ}}}{H_{\text{ВВ}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{пер}}$  – мощность передатчика РЛС;  $G$  – коэффициент усиления антенны РЛС в направлении на ПРО.

Обозначим  $K = \frac{\gamma_{\text{ВВ}} V_{\text{ВВ}}}{H_{\text{ВВ}}}$  – как комплексный па-

раметр ТВВ, учитывающий толщину ТВВ  $H_{\text{ВВ}}$ , множитель потерь  $V_{\text{ВВ}}$  и степень захвата мощности ТВВ  $\gamma_{\text{ВВ}}$ .

Расчетное значение мощности отраженного от ПРО сигнала на входе приемника РЛС определится как:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G^2 \sigma_{\Pi} \lambda^2}{16\pi^3 R_{\Pi}^2} \cdot K_{\text{ии}}^2 = P_0 K_{\text{ВВ}}^2. \quad (3)$$

Здесь величина ЭПР ПРО  $\sigma_{\Pi}$  рассчитывается, исходя из размеров поверхности отражения ПРО ( $A_{\Pi}$ ), в предположении некогерентного суммирования эхо-сигналов от различных участков ПРО. Закон распределения амплитуды суммарного эхо-сигнала будет релеевским, в предположении гауссовского распределения эхо-сигналов от элементарных участков ПРО в пределах ДН [5].

При этом можно принять  $\sigma_{\Pi} = \sqrt{A_{\Pi}}$ , где  $A_{\Pi} = \Delta R_{\beta} H_{\Pi}$ ,  $\Delta R_{\beta}$  – линейный размер ДН по азимуту на дальности ПРО  $R_{\Pi}$ ;  $\Delta\beta_{0,5\text{р}} = 0,5^\circ = 0,008$  рад;  $H_{\Pi}$  – средняя высота ПРО на направлении  $\beta_i$ .

Мощность зондирующего сигнала  $P_{\text{пер}}$  рассчитывается в зависимости от типа ДН по углу места ("ЦЗ", "НВУ", или "НУ"), при этом учитывается мощность первого бокового лепестка ДН или основного лепестка ДН под малыми углами места.

Мощность эхо-сигнала в приемнике измеряется в канале "веса" относительно уровня шумов (В):

$$V = 20 \cdot \lg \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \quad [\text{дБ}]. \quad (4)$$

Поэтому далее из (3) и (4) для измеренного  $P_{\text{с}} = P_{\text{пр}}$  и расчетного  $P_0$  можно оценить значение комплексного показателя  $K_{\text{ВВ}}$ , характеризующего параметры ТВВ:

$$K_{\text{ВВ}} = \frac{P_{\text{с}}}{P_0},$$

Для получения более достоверной информации о параметрах ТВВ, такую оценку целесообразно провести для нескольких азимутальных направлений  $\beta_i$  с последующим усреднением результатов. Для анализа необходимо выбирать азимутальные

направления, для которых можно более точно оценить значения ЭПР ПРО (из составленной заранее карты пассивных помех). Если ПРО имеют незначительную высоту, то результаты расчета комплексного показателя  $K_{\text{ВВ}} = K_{\text{ВВ}}^{\text{H}}$  могут быть использованы для оценки дальности обнаружения маловысотных целей, находящихся в пределах приповерхностного ТВВ.

Если ПРО на азимутальном направлении имеют значительную высоту (элементы горной гряды), то для анализа (расчета  $K_{\text{ВВ}}$ ) используется часть энергии сигнала, отраженного от возвышенной части ПРО, которая просачивается через верхнюю стенку приповерхностного волновода и (или) проходит в пределах приподнятого ТВВ.

При этом результаты расчета  $K_{\text{ВВ}} = K_{\text{ВВ}}^{\text{B}}$  могут быть использованы для оценки дальности обнаружения целей, которые летят над приповерхностным волноводом или в пределах приподнятого ТВВ.

Далее полученные значения комплексных параметров ТВВ  $K_{\text{ВВ}}^{\text{H}}$  и  $K_{\text{ВВ}}^{\text{B}}$  используются для оценки максимальной дальности обнаружения маловысотных целей с определенной ЭПР  $\sigma_{\Pi}$ , летящих соответственно в пределах приповерхностного ТВВ ( $R_{\Pi}^{\text{H}}$ ) или выше него, в частности, в пределах приподнятого ТВВ ( $R_{\Pi}^{\text{B}}$ ).

Из (3) для  $\sigma = \sigma_{\Pi}$  и  $P = P_{\text{мин}}$  получим:

$$R_{\Pi}^{\text{H(B)}} = \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} \sigma_{\Pi}}{\pi P_{\text{мин}}}} \cdot \frac{G \lambda K_{\text{ВВ}}^{\text{H(B)}}}{4\pi}. \quad (5)$$

Здесь  $P_{\text{мин}} = P_{\text{пор}}$ , где  $P_{\text{пор}}$  – значение пороговой чувствительности приемника. Величина  $P_{\text{пор}}$  определяется из соотношения (4) для канала "веса":

$$V_{\text{пор}} = 20 \cdot \lg \frac{P_{\text{пор}}}{P_{\text{ш}}}.$$

Например, для  $V_{\text{пор}} = 16$  дБ получим

$$\frac{P_{\text{пор}}}{P_{\text{ш}}} \approx 7.$$

Учитывая тот факт, что параметры ТВВ изменяются с течением времени в пределах суток (день, ночь) и от сезона, оценку возможностей загоризонтного обнаружения целей необходимо проводить (обновлять) с определенной периодичностью.

Степень захвата энергии зондирующего сигнала тропосферным волноводом зависит от типа ДН по углу места (рис. 1, б), соответственно будут изменяться и возможности по обнаружению маловысотных целей. Поэтому анализ целесообразно провести для трех основных типов ДН по  $\varepsilon$  – для значений сдвига фазы в системе фазирования зондирующих сигналов верхней и нижней антенной структуры РЛС.  $\Delta\varphi = 0; \pi/2; \pi$ .

По результатам анализа выбирается значение  $\Delta\varphi_{\text{ф}}$ , при котором обеспечивается максимальная мощность эхо-сигнала от ПРО и, соответственно, максимальная дальность обнаружения маловысотных целей.

Стабильность параметров ТВВ, в частности, степени захвата энергии сигнала, можно оценить по значениям разброса амплитудных и фазовых характеристик эхо-сигналов на входе приемника за определенный интервал времени. Для этого используется информация соответственно весового (амплитудного) канала и канала фазотраекторного накопления (ФТН).

Например, для амплитудных характеристик оцениваются среднее  $\bar{B}$  и дисперсия  $\sigma_B^2$  "веса" сигнала:

$$\bar{B} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N B_j ;$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N B_j - \bar{B} ;$$

где  $B_j$  – измеренное значение "веса" сигнала в  $j$ -м такте ( $j = 1, 2, \dots, N$ ).

В условиях нестабильности амплитуды и фазовых характеристик эхо-сигналов для обеспечения когерентности обработки в режиме ФТН целесообразно использовать внешнюю когерентность, то есть измерение фазы эхо-сигналов проводить относительно фазы отражений от ПРО, а не фазы сигнала когерентного гетеродина. При этом компенсируются флуктуации фазы сигналов за счет неоднородности среды РРВ  $\delta\varphi_i$ , так как эхо-сигналы от ПРО и от цели проходят по одной трассе:

$$\varphi_i = \varphi_{\text{сi}} + \delta\varphi_i - \varphi_{\text{пi}} + \delta\varphi_i = \varphi_{\text{сi}} - \varphi_{\text{пi}} .$$

Режим когерентной обработки (ФТН) позволяет уточнить значения радиальной составляющей скорости цели и обеспечить разрешение её элементов.

## Выводы

Для установления факта наличия ТВВ и оценки его параметров (степени захвата энергии радиолокационного сигнала) могут быть использованы реперы – поверхностно-распределённые объекты с эталонными характеристиками (известными ЭПР), которые имеются на трассе РРВ. При измерении амплитудных характеристик эхо-сигналов от таких объектов в канале "веса" РЛС можно оценить значения комплексного показателя степени захвата энергии сигнала и, соответственно определить максимальную дальность обнаружения типовых целей с известными ЭПР.

## Список литературы

1. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
2. Експериментальне дослідження параметрів тропосферних радіоволноводів над морем / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, Є.В. Лукашук, А.В. Челпанов // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 3(7). – С. 54-57.
3. 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.
4. Розробка регіональної системи радіолокаційного спостереження маловисотних цілей на основі комплексування засобів радіотехнічних військ ППО, дальнього виявлення та сторонніх джерел випромінювання.: Звіт про НДР (промисловий). Шифр "Поле-98", ХУПС. – Х., 2005. – 305 с.
5. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.

Поступила в редколлегию 24.06.2010

**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 of non-homogeneities of 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.