

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ЦЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНО- СТЬЮ

к.т.н. Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов, Ю.И. Рафальский
(представил д.т.н., проф. А.В. Полярус)

В статье рассмотрен механизм захвата электромагнитных волн (ЭМВ) в тропосферный волновод, оценены потенциальные значения показателей качества и максимальная дальность обнаружения целей, летящих в тропосферном волноводе над морской поверхностью.

Постановка проблемы. Работа РЛС приморского базирования часто бывает осложнена отклонениями электрических параметров атмосферы от стандартных. Сверхрефракционное распространение радиоволн может приводить как к увеличению, так и к уменьшению дальности обнаружения цели [1, 2], появлению ложных отметок на индикаторах РЛС и ошибкам в определении координат цели. В общем случае отклонение рефракции от нормальной приводит к изменению зоны и показателей качества обнаружения [3].

Анализ литературы. Причиной сверхрефракции являются инверсии температуры и влажности, возникающие в нижней части тропосферы [4 – 7]. В этом случае вертикальный профиль коэффициента преломления $n(z)$ имеет участки (рис. 1), на которых $dn/dz > 0$. Такое значение градиента коэффициента преломления приводит к образованию тропосферного волновода (ТВВ).

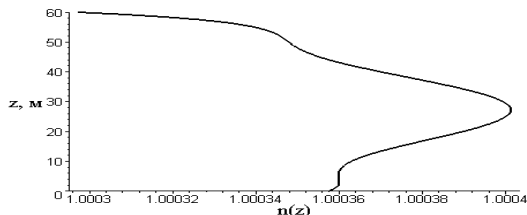


Рис. 1. Пример вертикального профиля коэффициента преломления при наличии тропосферного волновода

Величина критического угла $\Theta_{кр}$, под которым происходит захват ЭМВ в

ТВВ, зависит от вертикальных размеров волновода и значения градиента dn/dz . Вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения, а также максимальная дальность обнаружения цели, являются основными параметрами, характеризующими работу РЛС. Поэтому влияние изменений условий распространения ЭМВ (в частности свехрефракции) на показатели качества обнаружения необходимо оценивать и учитывать.

Цель статьи. Произведем оценку дальности и показателей качества обнаружения цели при условии, что антенна совмещенной РЛС и цель находятся внутри волновода, и сравним полученные результаты с данными для свободного пространства.

Модель условий распространения ЭМВ. Для простоты анализа процессов, происходящих в волноводе, используем его простейшую модель.

Представим ТВВ как область пространства без потерь, имеющую безграничные плоские горизонтальные верхнюю и нижнюю стенки. Так как возникновение тропосферных волноводов обусловлено образованием инверсионных слоев, то по аналогии с метеорологией расстояние от подстилающей поверхности до нижней стенки ТВВ будем называть высотой волновода, и обозначим как $h_{\text{вв}}$, а расстояние между стенками будем называть мощностью волновода и обозначим как $H_{\text{вв}}$.

Траектория радиоволны, падающей на стенку ТВВ с внутренней стороны под углом $\Theta_{\text{пад}} \leq \Theta_{\text{кр}}$, за время прохождения по вертикали расстояния $z \leq H_{\text{вв}}$ настолько изгибается в обратную сторону, что это можно сравнить с отражением от стенки волновода. Если же $\Theta_{\text{пад}} > \Theta_{\text{кр}}$, то радиоволна проходит сквозь стенку и выходит из волновода. В случае, когда радиоволна падает на ТВВ с внешней стороны, то она проходит сквозь стенку независимо от величины угла падения $\Theta_{\text{пад}}$ (рис. 2, б).

Из вышеизложенного следует, что для наилучшего использования направляющих свойств ТВВ необходимо, чтобы антенна РЛС находилась внутри волновода, т.е. высота подъема антенны h_a должна быть $h_{\text{вв}} \leq h_a \leq h_{\text{вв}} + H_{\text{вв}}$, причем для разнесенной радиолокации нахождение приемной антенны внутри ТВВ принципиально необходимо.

Дальность действия РЛС в тропосферном волноводе. Найдем дальность действия РЛС при наличии ТВВ. Пусть цель и антенна совмещенной РЛС находятся внутри ТВВ на его оси. Так как принятая нами модель учитывает лишь самые общие свойства ТВВ, то для ее уточнения введем множитель потерь $V_{\text{вв}}$. С помощью этого коэффициента учтем высвечивание электромагнитной энергии из волновода за счет неровно-

стей стенок ТВВ, наличия мелкомасштабных неоднородностей диэлектрической проницаемости и горизонтальных градиентов коэффициента преломления воздуха, изменения вертикальных размеров ТВВ вдоль трассы локации и других факторов. Величина $V_{\text{ВВ}}$ требует дополнительных исследований.

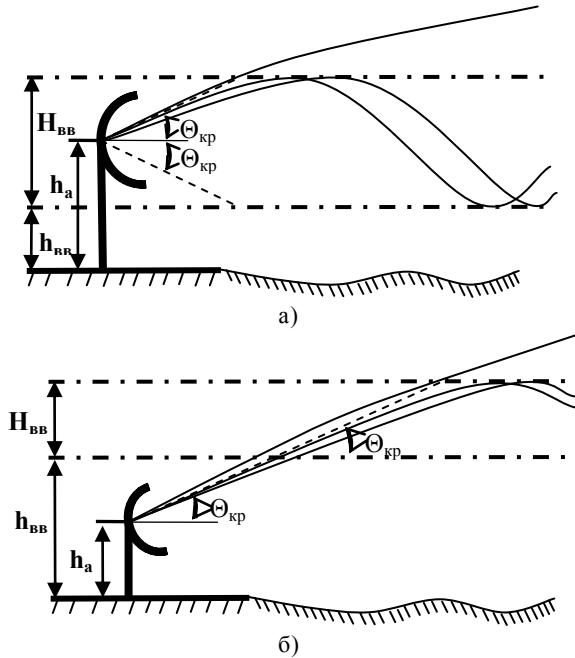


Рис. 2. Пример траекторий ЭМВ в тропосферном волноводе

Плотность потока мощности, создаваемая антенной в таких условиях, равна

$$S_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{п}} \cdot G}{2\pi \cdot r \cdot H_{\text{ВВ}}} \cdot \gamma_{\text{ВВ}} \cdot V_{\text{ВВ}},$$

где $P_{\text{п}}$ – мощность передатчика; r – расстояние до цели; $\gamma_{\text{ВВ}} = 2\Theta_{\text{кр}} / \pi$ – коэффициент, который показывает, какая часть мощности излучается в волновод; G – коэффициент усиления антенны РЛС в направлении на цель:

$$G = G_{\text{max}} \cdot F^2(\theta, \varphi), \quad \theta = \varepsilon_{\text{ц}}, \quad \varphi = \beta_{\text{ц}},$$

где G_{max} – максимальный коэффициент усиления антенны; $F^2(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности антенны по мощности; $\varepsilon_{\text{ц}}$ – угол места цели;

$\beta_{ц}$ – азимут цели.

Так как размеры цели, как правило, гораздо меньше $H_{ВВ}$, то ее можно считать точечной, а фронт падающей волны плоским. Тогда плотность потока мощности у приемной антенны составляет

$$S_{пр} = \frac{S_{ц} \cdot \sigma_{ц}}{2\pi \cdot r \cdot H_{ВВ}} \cdot \gamma_{ВВ} \cdot V_{ВВ}.$$

Вводя эффективную площадь антенны $A = P_{пр}/S_{пр}$, получаем мощность сигнала на входе приемника РЛС

$$P_{пр} = \frac{P_{п} \cdot G \cdot \sigma_{ц} \cdot A}{(2\pi)^2 \cdot H_{ВВ}^2 \cdot r^2} \cdot \gamma_{ВВ}^2 \cdot V_{ВВ}^2.$$

Так как $A = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G$, то

$$P_{пр} = \frac{P_{п} \cdot G^2 \cdot \sigma_{ц} \cdot \lambda^2}{16\pi^3 \cdot H_{ВВ}^2 \cdot r^2} \cdot \gamma_{ВВ}^2 \cdot V_{ВВ}^2, \quad (1)$$

а дальность действия РЛС при наличии тропосферного волновода определяется выражением

$$r_{ВВ} = \sqrt{\frac{P_{п} \cdot G^2 \cdot \sigma_{ц} \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{ВВ}^2 \cdot V_{ВВ}^2}{16\pi^3 \cdot H_{ВВ}^2 \cdot P_{пр}}}.$$

Если $P_{пр} = P_{пр\min}$, то максимальная дальность действия РЛС составит

$$r_{ВВ\max} = \sqrt{\frac{P_{п} \cdot G^2 \cdot \sigma_{ц} \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{ВВ}^2 \cdot V_{ВВ}^2}{16\pi^3 \cdot H_{ВВ}^2 \cdot P_{пр\min}}}.$$

Сравним дальность действия РЛС в свободном пространстве $r_{св}$ и при наличии тропосферного волновода $r_{ВВ}$.

Мощность сигнала, поступающая на вход приемника РЛС, работающей в свободном пространстве, равна [3]

$$P_{пр}^{св} = \frac{P_{п} \cdot G^2 \cdot \sigma_{ц} \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r_{св}^4}. \quad (2)$$

Пусть на вход приемника в обоих случаях поступает одинаковая мощность ($P_{пр}^{св} = P_{пр}^{ВВ}$), тогда из (1) и (2)

$$r_{\text{ВВ}} = \frac{4 \cdot r_{\text{СВ}}^2}{H_{\text{ВВ}}} \cdot \gamma_{\text{ВВ}} \cdot V_{\text{ВВ}} \cdot$$

Показатели качества обнаружения РЛС при работе в ТВВ. Теперь найдем, во сколько раз возрастает мощность принимаемого сигнала с заданной дальности r при наличии тропосферного волновода по сравнению со свободным пространством. Из уравнений (1) и (2) находим, что

$$k = \frac{P_{\text{пр}}^{\text{ВВ}}}{P_{\text{пр}}^{\text{СВ}}} = \left(\frac{4 \cdot r}{H_{\text{ВВ}}} \cdot \gamma_{\text{ВВ}} \cdot V_{\text{ВВ}} \right)^2.$$

При дальности действия РЛС в 90 км, мощности волновода 200 м, $\Theta_{\text{кр}} = 30'$ и отсутствии потерь ($V_{\text{ВВ}}=1$) выигрыш составит 20 дБ. Такой выигрыш обеспечивается за счет концентрации энергии в узкой области пространства между стенками волновода.

Возрастание мощности принимаемого сигнала с заданной дальности в условиях тропосферного волновода приводит к возрастанию отношения сигнал/шум q на входе приемника, что в свою очередь повлияет на показатели качества обнаружения РЛС.

Наибольшее отношение сигнал/шум q на входе приемника для обеспечения заданных показателей качества обнаружения требуется для сигнала со случайной фазой и случайной амплитудой. Найдем, как изменятся показатели качества обнаружения такого сигнала при возрастании q в k раз.

Вероятность правильного обнаружения D сигнала со случайной начальной фазой и релейской случайной амплитудой находим из выражения [3]:

$$D = F^{1/(1+q^2/2)},$$

где F – вероятность ложной тревоги, откуда

$$D_{\text{ВВ}} = F^{1/(1+kq^2/2)}.$$

На рис. 3 приведены кривые обнаружения при работе РЛС в условиях ТВВ при $F=10^{-6}$. Свободному пространству соответствует $k=1$. По рис. 3 видно, что при работе в тропосферном волноводе вероятность правильного обнаружения резко повышается.

Выводы. 1. Дальность обнаружения цели в тропосферном волноводе пропорциональна корню второй, а не четвертой степени, как для свободного пространства, и обратно пропорциональна вертикальным размерам ТВВ.

2. За счет концентрации энергии в узкой области пространства между стенками волновода мощность принимаемого РЛС сигнала в ТВВ, гораздо выше, чем в свободном пространстве. Это приводит к увеличению соотношения сигнал/шум на входе приемника.

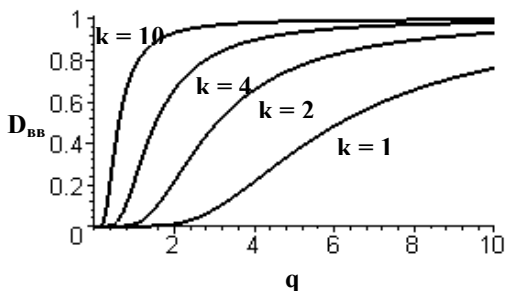


Рис. 3. Кривые обнаружения сигнала со случайной начальной фазой и релейской случайной амплитудой

3. Кривые обнаружения в условиях ТВВ идут выше кривых обнаружения в свободном пространстве, следовательно, вероятность правильного обнаружения цели в волноводе выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954.
2. Polyarus A.V., Koval A.A., Tsekhmistrov E.V. *Elektromagnetic field of an antenna located near a sea tropospheric waveguide // Proceeding of III-rd International Conference on Antenna Theory and Techniques.* – 1999. – P.138 – 139
3. Ширман Я.Д. *Теоретические основы радиолокации.* – М.: Сов. радио, 1970.
4. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн.* – М.: Сов. радио, 1972.
5. Черный Ф.Б. *Распространение радиоволн.* – М.: Сов. радио, 1972.
6. Введенский Б.А. *Распространение УКВ радиоволн.* – М.: Наука, 1973.
7. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. *Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере.* – М.: Наука, 1976.

Поступила 11.08.2003

КАРЛОВ Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник научного центра при ХВУ. Окончил ХВУ в 1995 году. Область научных интересов – военная кибернетика, радиолокация.

МИСАЙЛОВ Виталий Леонидович, адъюнкт ХВУ. Область научных интересов – военная кибернетика, радиолокация.

РАФАЛЬСКИЙ Юрий Иванович, начальник факультета Харьковского военного университета. Область научных интересов – военная кибернетика, радиолокация.