

УДК 538.566.2

О НОВОМ ПОДХОДЕ К ПРОБЛЕМЕ ЗАГОРИЗОНТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ

В. Н. Дацко

Национальный исследовательский университет МИЭТ

Получена 3 июня 2013 г.

Аннотация. Проведен сравнительный анализ характеристик распространения объёмных и поверхностных электромагнитных волн над океанской поверхностью: приведены результаты расчёта, определяющие область частот, в которой затухание земного луча оказывается больше, чем у поверхностной волны; установлена граничная частота, ниже которой лучше распространяется поверхностная волна, а выше – объёмная; установлено, что спад поля при удалении от источника у поверхностной волны происходит значительно медленнее, чем у земного луча; рассмотрены влияние морского волнения и теория Баррика. Показано, что для мониторинга поверхности океана и морской радиосвязи предпочтительнее поверхностная электромагнитная волна, нежели земной луч. Обсуждается возможность создания радиолокатора на поверхностной электромагнитной волне.

Ключевые слова: радар, антенна, поверхность, электромагнитные волны, загоризонтная локация, связь.

Abstract. The aim of the paper is a comparative analysis of the distribution characteristics of measurement and surface electromagnetic waves on the ocean surface: the results of calculations that determine the frequency range in which the attenuation of the beam is larger than that of the surface wave, is presented; a limit frequency is found, below which the surface wave spreads better and higher – the volume wave; it is found that the the recession of field when you remove a field from the source surface wave is much slower than that of the beam. Effect of sea waves and Barrik theory are considered. It is shown that for monitoring ocean surface and maritime radio communication it is preferable the surface electromagnetic wave than

Earth's Ray. The possibility of creating a surface radar electromagnetic wave is discussed.

Keywords : radar, antenna, superficiality, electromagnetic waves, over-the-horizon location, communications.

Пространственные и поверхностные электромагнитные волны

В настоящее время все существующие беспроводные системы связи и радиолокации используют электромагнитные волны, распространяющиеся в свободном трёхмерном пространстве *прямолинейно*. Их называют пространственными или объёмными волнами. Энергия объёмной волны, возбуждённой симметричным источником, уменьшается *обратно пропорционально квадрату расстояния* от него. Эти два фактора принципиально ограничивают дальность обнаружения обычным СВЧ-радиолокатором целей вблизи поверхности Земли расстояниями в пределах прямой видимости, т.е. линией горизонта. Объекты, находящиеся за линией горизонта, для них невидимы, т.к. радиолуч не огибает круглую Землю. Таким образом кривизна Земли и прямолинейность распространения пространственной электромагнитной волны порождают проблему загоризонтной радиолокации и связи.

Дальность действия радара можно повысить за счёт использования дифракции более длинных волн на поверхности Земли. В этом направлении ведутся в настоящее время все зарубежные и отечественные исследования в области загоризонтной радиолокации [1]. В последние годы в США, Англии и России активно разрабатываются и рекламируются «РЛС на поверхностных волнах», которые на самом деле к истинно поверхностным (двумерным) электромагнитным волнам никакого отношения не имеют. В них используются обычные пространственные (трёхмерные) волны. Термин «поверхностная» используется только потому что радиолуч прижат к Земле, как бы стелется над её поверхностью. Это т.н. «земной луч», давно и хорошо известный в радиофизике. За счёт дифракции и преломления в приземном пространстве

дальность действия РЛС на земном луче может быть повышена до 250-300 км. При этом длина передающих и принимающих антенн достигает нескольких километров, а стоимость систем порядка миллиарда долларов.

Созданы также системы дальнего обнаружения, использующие посыл и отражение радиолуча от ионосферы Земли. Их принципиальный недостаток – наличие мёртвых зон, «невидимых» для радара, протяжённостью несколько тысяч км. Они «освещают» лишь небольшую площадь порядка 50 кв. км на удалении в 3000 км, а весь промежуток 0-3000 км остаётся для них невидимым; вариация частоты радиолуча также не спасает положения.

Из вышеизложенного следует, что возможности пространственных электромагнитных волн и сформированного из них прямого радиолуча исчерпаны и нужны принципиально новые подходы: например, использовать *поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ)*.

Существование ПЭВ следует из уравнений Максвелла для проводящей среды с соответствующими граничными условиями. Волны могут возбуждаться на поверхности раздела проводящей среды с диэлектриком: Земли или океана с воздухом; ионосферы с атмосферой. При распространении вдоль поверхности эти двумерные волны следуют за её кривизной и ослабляются *обратно пропорционально расстоянию* от источника. По третьей координате (высоте) они экспоненциально затухают, так что вся энергия волны сосредоточена в тонком приповерхностном слое. Волны существуют в широком диапазоне частот: от нулевых до оптических.

ПЭВ известны более ста лет, но до сих пор полностью не изучены. Теория была построена в начале XX века немецкими теоретиками Зоммерфельдом и Ценником [2,3]. Однако ни в одном из натуральных экспериментов, проведённых в разных странах, ПЭВ не были обнаружены [4-7], что послужило основанием для утверждения о принципиальной невозможности их существования [8]. К середине XX века исследователи потеряли интерес к поверхностным электромагнитным волнам. Возрождение произошло в 60-70 годы, когда в России и за рубежом появились

многочисленные теоретические работы, в особенности [9-12], и были получены экспериментальные доказательства существования ПЭВ: волны сверхвысоких частот были обнаружены и исследованы в лабораторных условиях в полупроводниках [13,14], на океанской воде [15, 16], газовой плазме [17] и металлах [18]; наблюдались в естественных условиях [19].

Поверхностные электромагнитные волны на океанской поверхности

Наблюдение и идентификация поверхностных электромагнитных волн в лаборатории является первым этапом в изучении этого явления. Следующий шаг состоит в исследовании их возбуждения и распространения в естественных условиях. Как одну из первых попыток в этом направлении можно рассматривать работу Хилла и Вайта [20], теоретически рассмотревших задачу о возбуждении волны на поверхности плоской Земли и моря горизонтальным магнитным диполем. Такая постановка задачи является всего лишь грубым приближением к действительности, поскольку не учитывает основных факторов, характерных для распространения волны в естественных условиях: сферичность Земли и морское волнение.

Влияние кривизны Земли на распространение ПЭВ в КВ-диапазоне незначительно, т.к. все эффекты, возникающие в этом случае, определяются малым параметром h_0/a , где h_0 -высота локализации волны, a - радиус Земли. Кривизна Земли слабо влияет на распространение поверхностной волны, поскольку радиус Земли намного (на несколько порядков) превышает как длину волны, так и высоту её локализации. Поэтому амплитуда поля поверхностной волны будет изменяться с расстоянием R до источника как

$$E_z \sim \frac{e^{-\alpha_s R}}{\sqrt{R}}, \alpha_s = k_0 \operatorname{Im} \sqrt{1 - Z^2} \quad (1)$$

где $Z=1/\sqrt{\epsilon}$ -поверхностный импеданс воды, ϵ -комплексная диэлектрическая проницаемость воды.

Затухание поверхностной волны будет определяться, в основном, её диссипативным экспоненциальным затуханием. На рис.2 приведена зависимость коэффициента затухания α_s от частоты при солёности воды 35‰; данные по диэлектрической проницаемости ϵ воды взяты из работы [21]. Для объёмной волны кривизна Земли, напротив, очень существенна. Поэтому для определения диапазона частот, в которой радиолокатор на поверхностной волне будет иметь преимущество перед локатором на земном луче, необходимо определить спад поля последнего при удалении от антенны.

Как известно, объёмные электромагнитные волны могут огибать кривизну Земли благодаря дифракции. Если над плоской поверхностью поле волны спадает как $1/R^2$, то над сферической поверхностью объёмное поле, распространяясь за счет дифракции, изменяется по закону [22]

$$E_z = \frac{300\sqrt{P}}{R} V \quad (2)$$

где P - мощность передатчика в кВт, R - расстояние до передающей антенны в км, а V - функция ослабления для сферической Земли, показывающая, во сколько раз поле диполя на поверхности поглощающей сферической Земли отличается от поля диполя на поверхности плоской бесконечно проводящей Земли, причём

$$V \cong 0,365 \sqrt{\frac{R}{\lambda^{1/3}}} \frac{\exp(0,0425 \frac{R}{\lambda^{1/3}} \text{Im}t_1)}{|t_1 - q^2|} \quad (3)$$

где λ - длина волны в метрах, а величины q и t_1 определяются соотношениями

$$q = \frac{A}{i\sqrt{\epsilon}}, \quad A = 3\sqrt{\frac{\pi a}{\lambda}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} t_1(q) &= 0,51 - i 0,88 - (0,25 + i 0,95)|q| & |q| \leq 0,5 \\ t_1(q) &= 1,17 - i 2,03 + 0,71(1+i)/|q| & |q| \geq 2 \end{aligned} \quad (5)$$

где a - радиус Земли. Необходимо заметить, что на больших расстояниях дальность распространения земного луча может возрастать из-за рефракции в тропосфере, которую можно учесть введением эффективного радиуса Земли. При учёте атмосферной рефракции следует брать $a=8500$ км.

Формула (3) справедлива при $R \geq R_{\min}$, где

$$R_{\min} = \frac{a}{A} \quad (6)$$

Зависимость R_{\min} от частоты приведена на рис. 1. При $R > R_{\min}$

экспоненциальное затухание объёмной волны определяется коэффициентом

$$\alpha_v = 0,0425 R/\lambda^{1/3} \operatorname{Im} t_1 \quad (7)$$

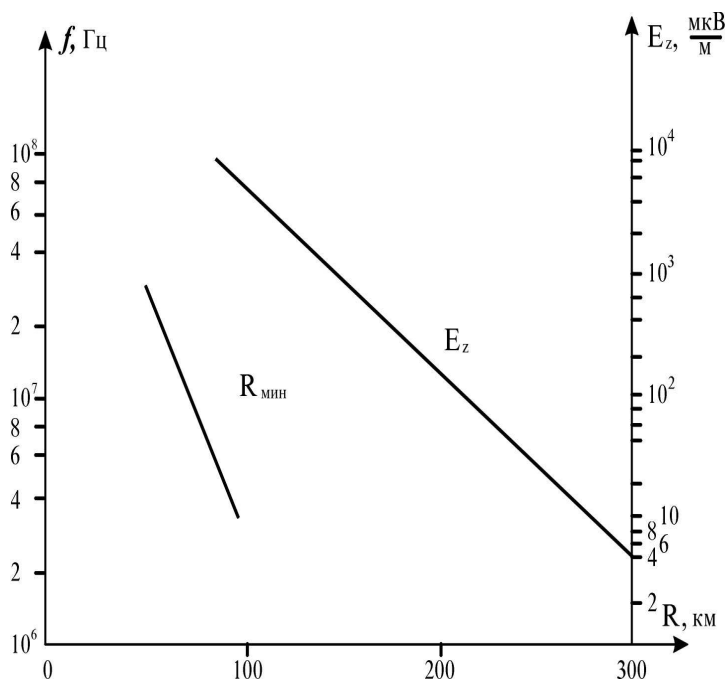


Рис.1 Зависимость R_{\min} от частоты для земного луча и вертикальной компоненты напряжённости электрического поля поверхностной волны от расстояния

На рис.2 приведены результаты расчёта, определяющие область частот, в которой затухание земного луча оказывается больше, чем у поверхностной волны: точка пересечения графиков α_s и α_v определяет частоту f_0 , ниже которой лучше распространяется поверхностная волна, а выше – объёмная.

Соотношение (2) показывает, что распространение объёмных волн в области тени в какой-то степени аналогично распространению поверхностной волны, поскольку расходимость земного луча от источника оказывается того же типа, что и у поверхностной волны, т.е. поле в луче спадает как $\frac{1}{\sqrt{R}}$. Кроме того, поле луча имеет значительное экспоненциальное затухание. По-видимому, если не учитывать вертикальную структуру земного луча, его можно рассматривать как распространяющуюся по поверхности сферической Земли излучающую поверхностную (или псевдоповерхностную) волну, часть энергии которой излучается в пространство.

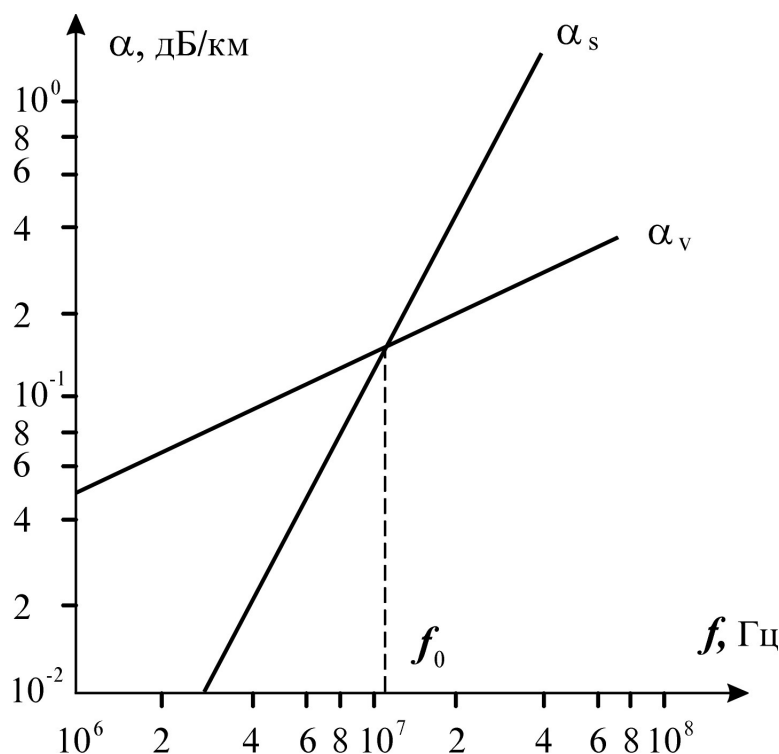


Рис.2 Затухание поверхностной (α_s) и объёмной (α_v) волны в зависимости от частоты

Вторым важным фактором, влияющим на распространение электромагнитных волн по морской поверхности, является волнение. Этому посвящена работа Баррика [23], в которой рассматривалось распространение поля, излученного электрическим диполем, по взволнованной поверхности моря с учётом сферичности Земли. Барриком был развит подход, при котором взволнованная морская поверхность заменяется гладкой поверхностью с

некоторым эффективным импедансом, определяемым через электрические свойства воды и параметры морского волнения.

В своих работах Баррик показал, что морское волнение приводит к дополнительным потерям энергии при распространении электромагнитной волны над морем, которые, однако, невелики по сравнению с диссипативными потерями на гладкой поверхности воды. Так например, морское волнение, создаваемое ветром со скоростью 15 м/сек на частоте 20 МГц при дальности распространения электромагнитной волны 100 миль ослабляет проходящий сигнал на 12 дБ ниже уровня, соответствующего гладкой поверхности. Серьёзным недостатком работы Баррика является то, что из-за методически неправильного подхода (полное поле диполя не разделяется на объёмные и поверхностные волны) полученные результаты трудно интерпретировать. Поэтому неясно, какую собственно волну он использует - земной луч или поверхностную волну? По нашему мнению, Баррик основывается на т.н. поверхностной волне Нортонa, которая представляет собой сложное многомодовое образование и не является волной в строгом смысле этого слова. Так, если волну Нортонa поместить в резонатор, то она “расползется” на отдельные моды, в том числе, видимо, и поверхностную волну. С рассматриваемой нами поверхностной волной такого не происходит, это «настоящая» волна.

Результат численного расчёта, приведённый Барриком, показывает, что электромагнитное поле на сферической поверхности Земли имеет сложную структуру: вблизи поверхности распространяется поверхностная волна, выше которой проходит земной луч. Численные значения затухания, полученные Барриком, не соответствуют ни той, ни другой волне и занимают промежуточное положение между ними. Так на частоте менее 15 МГц затухание поля у Баррика оказывается меньше, чем у земного луча, и больше, чем у поверхностной волны. Это говорит о том, что волна, рассмотренная Барриком, представляет собой смесь этих двух волн.

Поверхностная волна и земной луч

Проведем сравнительный анализ распространения электромагнитного поля поверхностной волной и земным лучом. Мощность передатчика 100 кВт, частота 5 МГц (длина волны 60 м), соленость океанской воды 3.5%, диэлектрическая проницаемость воды на этой частоте $\varepsilon = 80 + 2 \times 10^4 i \sim 2 \times 10^4$, затухание ПВ составляет $\alpha_s = 0,03 \text{ дБ/км}$, затухание земного луча $\alpha_v = 0,15 \text{ дБ/км}$. Напряжённость поля ПВ вычисляется по формуле (1), земного луча по формулам (2) и (3). Здесь необходимо сделать некоторые пояснения.

1. Вообще говоря, при удалении от источника на расстояние R км амплитуда поля E спадает по exp, т.е.

$$E = E_0 e^{-\alpha R} \quad (8)$$

где $E = E_0$ при $R = 0$, α - постоянная затухания, $[\alpha] = \text{км}^{-1}$.

Для ПВ необходимо учесть ослабление поля за счет радиальной расходимости потока энергии от (точечного) источника. При этом (1) приобретает вид

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{R}} e^{-\alpha R} \quad (9)$$

На расстоянии $R = 1 \text{ км}$ от источника $E = E_0 e^{-\alpha}$, откуда

$$\frac{E_0}{E} = e^{\alpha} \quad (10)$$

Если затухание α_s дано на единицу длины (в дБ/км), необходимо перейти от α_s к α . По определению

$$\alpha_s = 20 \lg \frac{E}{E_0} \quad (11)$$

т.к. $E_0 > E$, то $\alpha_s < 0$. Сравнивая (3) и (4), получим

$$\alpha = \frac{\alpha_s}{20 \lg e} \quad (12)$$

в (5) α_s дано в дБ/км, а α в км⁻¹.

2. По формулам для земного луча было найдено, что на расстоянии от источника в 1 км ($R=1$) $E=E_0=464$ мВ/м. Зная напряжённость электрического поля E в зависимости от расстояния от излучателя, можно найти плотность потока энергии, переносимой поверхностной волной и земным лучом. Энергия переменного электромагнитного поля локализована в пространстве с объёмной плотностью W

$$W = \frac{E\epsilon_0\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0\mu H^2}{2}$$

в системе (СИ) и распространяется с групповой скоростью c (в вакууме).

Количество энергии, переносимое в единицу времени через единичную поверхность, перпендикулярную направлению распространения, определяется вектором Пойнтинга (мгновенной плотностью потока энергии)

$$\vec{P} = [\vec{E}\vec{H}]$$

где H -магнитное поле.

Магнитное поле можно найти из уравнений Максвелла для плоской волны:

$$\sqrt{\mu_0}H = \sqrt{\epsilon_0}E$$

Мы рассматриваем электромагнитные волны только в волновой зоне - области пространства, отстоящей от излучателя на расстояниях, значительно превышающих его размеры и длину излучаемых волн. В пределах малых участков волновой зоны волну можно считать плоской. Окончательно, поток мощности через единичную площадку.

$$\vec{P} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E^2$$

На рис.3 показана мощность излучения в зависимости от расстояния от излучателя, переносимая ПЭВ и земным лучом. Видно, что ПЭВ имеют неоспоримые преимущества перед земным лучом. На поверхностной волне может осуществляться морская радиосвязь.

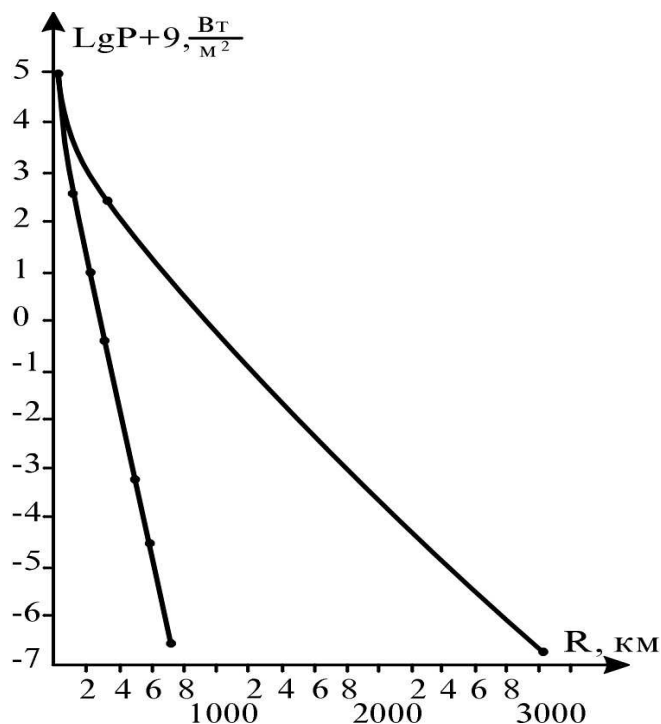


Рис.3 Мощность излучения в зависимости от расстояния, переносимая ПЭВ (справа) и земным лучом

Радиолокатор ПЭВ

Радиолокатор, использующий поверхностную электромагнитную волну, может решить следующие задачи:

а) Дальняя загоризонтная радиолокация. Поверхностная волна огибает кривизну Земли, т.ч. последняя не является препятствием для её распространения. Расходимость луча радиолокатора на поверхностных волнах значительно меньше, чем на объёмных (земном луче), поэтому можно ожидать, что в декаметровом диапазоне дальность действия загоризонтного локатора значительно возрастёт.

б) Обнаружение низколетящих целей на высотах менее 100 м. Для радиолокатора поверхностной волны вероятность обнаружения цели возрастает с приближением цели к поверхности воды. Такой радиолокатор перекрывает мёртвую зону обычных локаторов в области малых высот и делает применение низколетящих средств нападения нецелесообразным.

в) Радиолокатор поверхностной волны может быть использован для обнаружения электродинамических аномалий воды, источником которых могут являться, например, физические поля подводных лодок. Кроме того, он может быть использован в целях навигации, для проводки судов в стеснённых условиях, обнаружения кромок ледовых полей, мониторинга океанской поверхности и т.д.

Использование радиолокатора ПЭВ для дистанционного контроля за состоянием поверхности океана перспективно с точки зрения совершенствования применяемых методов получения океанографической и метеорологической информации. СВЧ РЛС, предназначенные для этих целей, обычно располагаются у береговой линии и имеют весьма ограниченную дальность- порядка 10 км. Применяемые в настоящее время специальные суда и буи не обеспечивают необходимой статистики измерений. Использование радиолокатора на поверхностных электромагнитных волнах с вертикальной поляризацией зондирующего сигнала позволяет наблюдать за состоянием поверхности океана на дальностях более 200 км. (по оценкам зарубежных специалистов [24,25] исходящих из теории Баррика [23]). Полезная информация содержится в доплеровских спектрах эхо-сигналов.

В настоящее время из-за отсутствия необходимых данных крайне сложно провести *оценку тактико-технических характеристик радиолокатора ПЭВ*. Единственной известной нам попыткой такого рода является работа Мильмана и Нельсона [26], которые, исходя из теории Баррика [23], рассмотрели возможность создания такого локатора и нашли, что он даст возможность обнаруживать цели над морской поверхностью на расстояниях 300-400 км.

При оценке возможности локатора Мильман и Нельсон использовали следующее соотношение для определения отношения сигнал/шум на входе локатора

$$\frac{P_l}{N} = \frac{P_t G_t G_l t 4\pi\sigma}{kT_c F_0 L_{sw}^2 L_s \lambda^2} \quad (13)$$

где P_l -мощность сигнала, отраженного от цели, N -уровень внешних шумов, P_t -средняя мощность передатчика, G_t и G_l -коэффициенты усиления приёмной и передающей антенн, t -время интегрирования сигнала, σ -эффективная площадь рассеяния цели, k -постоянная Больцмана, T_0 -абсолютная температура внешней среды, F_0 -атмосферный шум-фактор, L_{sw} -потери волны на трассе, L_s -потери в трактах радиолокатора, λ -длина волны. Считалось, что эффективная площадь рассеяния цели является функцией частоты и зависит от неё по закону

$$\sigma = f^n$$

где σ -в квадратных метрах, f -в МГц, n -константа, которая при оценках принималась равной от 0 до 4. Для определенности принималось, что $\sigma = 10i^2$ на частоте 10 МГц, что, как указывают авторы, соответствует реальным целям, для обнаружения которых предназначается радиолокатор. Значения атмосферного шум-фактора выбирались из данных консультативного комитета по радио. Значения собственных потерь системы принималось равным 10 дБ.

При выборе рабочей частоты было найдено, что оптимальными для работы локатора являются частоты 5-10 МГц. При этих оценках потери прохождения волны на трассе принимались в соответствии с теорией Баррика, причем учитывались метеорологические факторы применительно к условиям Северной Атлантики.

Мильман и Нельсон рассмотрели также устройство антенной системы радиолокатора. Они пришли к выводу, что из-за больших потерь на трассе эффективность антенны в данном случае малосущественна, более существенна линейная апертура антенны, которая для получения хорошего разрешения должна составлять несколько километров. Предложена конструкция антенны в

виде антенной решетки из элементарных вибраторов, в которой как на передачу, так и на приём используются 10 центральных излучателей. Замечено, что антенна локатора должна располагаться в непосредственной близости от воды. Указано, что система из 5 радиолокаторов данного типа дает возможность создать сплошной радиолокационный барьер, перекрывающий Северную Атлантику от Гренландии до Норвегии.

При оценке этой работы необходимо учитывать следующее. Прежде всего, как уже отмечалось выше, полученные Барриком значения затухания ПВ не соответствуют ни земному лучу, ни поверхностной волне, а занимают промежуточное положение между ними. Это значит, что Мильман и Нельсон использовали существенно завышенное значение затухания поверхностной волны. Соответственно, подставляя в уравнение (13) величину L_{sw} соответствующую поверхностной волне, можно показать, что дальность действия радиолокатора, при сохранении неизменными всех остальных факторов, оказывается в несколько раз больше, чем полученная данными авторами.

Вторая неточность, допущенная Мильманом и Нельсоном, состоит в том, что они использовали значение атмосферного шум-фактора, полученного для объёмных электромагнитных волн, которое может не соответствовать таковому для поверхностной волны. Такой подход оправдан только отсутствием каких-либо данных о шумах на ПЭВ.

И, наконец, Мильман и Нельсон в своём расчёте использовали значение эффективного сечения рассеяния целей, также определенных для объёмных волн. Механизм отражения и дифракции объёмных и поверхностных волн различен, поэтому эффективная площадь рассеяния для ПЭВ должна иметь другие значения.

Все отмеченные факторы пока совершенно не исследованы. Из-за отсутствия данных нельзя определить, будут ли они способствовать увеличению дальности действия радиолокатора или, напротив, приведут к его уменьшению. Изучение этих факторов - предмет дальнейших исследований.

Выводы

Теоретические расчёты [27] и лабораторные эксперименты [28] показывают, что на основе поверхностных электромагнитных волн могут быть созданы радиолокаторы и системы связи, расширяющие возможности ныне существующих устройств, использующих земной луч (рис.4)

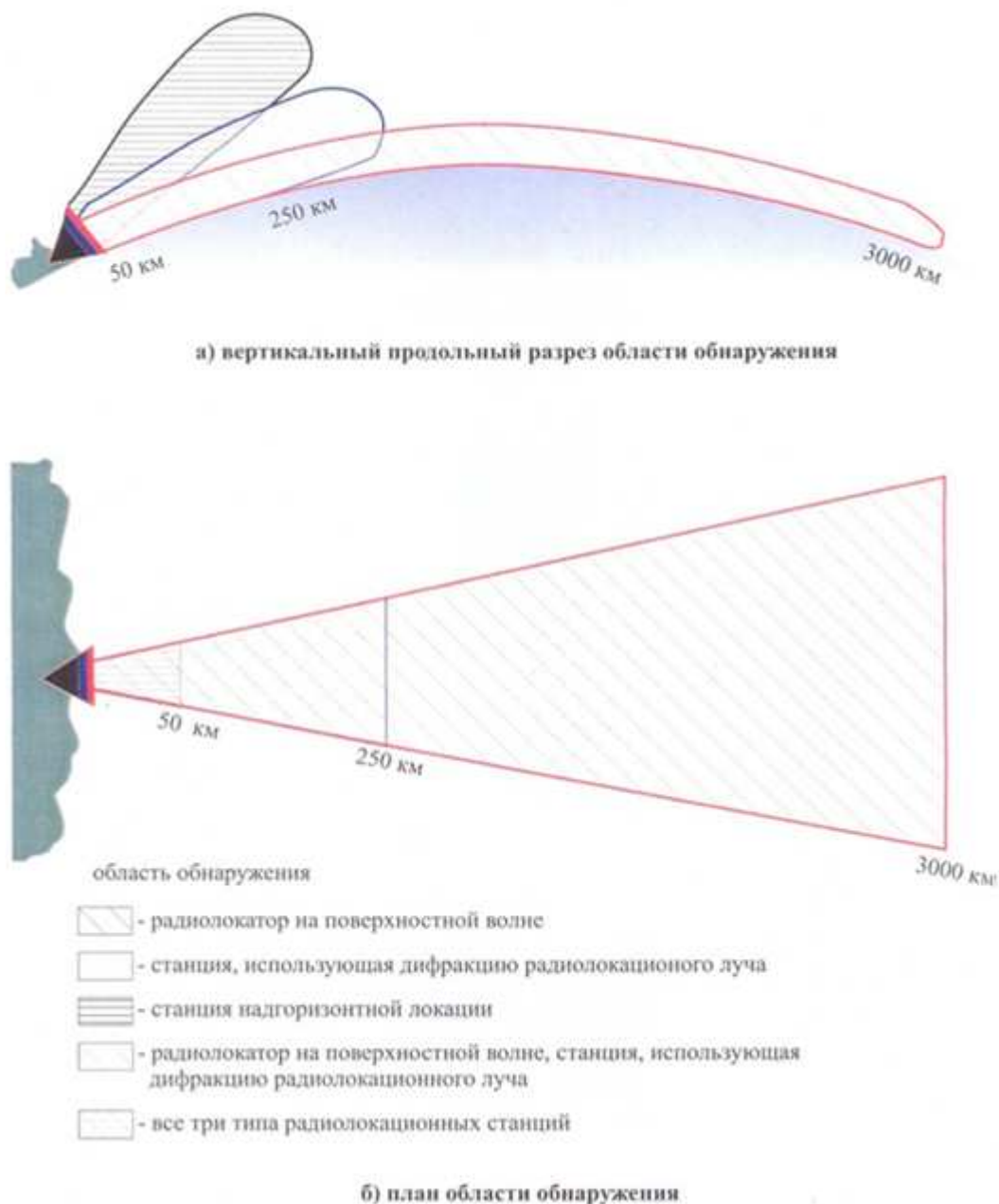


Рис.4 Области обнаружения объектов с использованием станции надгоризонтной локациии, станцией, использующей дифракцию радиолуча, радиолокатора ПЭВ

В частности, дальность обнаружения надводных целей позволит перекрывать мёртвые зоны; появится возможность обнаружения подводных объектов, низколетящих целей вблизи поверхности, причём вероятность обнаружения *возрастает* с уменьшением высоты. Возможно создание скрытого канала связи над поверхностью океана. На рис.4 показаны области обнаружения объектов обычным радиолокатором (50 км), РЛС на земном луче (250 км) и ПЭВ-локатором (свыше 500 км).

Возможность использования ПЭВ для радиолокации надводных объектов продемонстрирована в лабораторных условиях [28]. Технические решения защищены патентами РФ [29,30]. У России появилась реальная возможность открыть новое направление в радиолокации и связи.[31,32].

Литература

- 1.В.Петров// Современное состояние и перспективы развития загоризонтных систем и средств обнаружения. ж «Зарубежное военное обозрение»2006. № 3
2. Sommerfeld A. // Annalen der Physik. 1899. V. 303. № 2. P. 233.
3. Zenneck J.// Annalen der Physik. 1907. V. 328. №10. P.846.
- 4 С.В.Feldman “The optical behavior of the ground for short radio waves”
Proc. IRE v.21, p.764-801, 1933
- 5 С.Р.Burrows “Existence of surface wave in radio propagation” Nature, Zond, v.138, p.284, 1936
- 6 С.Р.Burrows “Radio propagation over plane earthfield strength curves”
Bell Syst. tech. J., 1937, v.16, p.45-77, 1203-1236
7. “Новейшие исследования радиоволн” сб. статей под ред Л.И.Мандельштамма и Н.Д.Папалекси, Гостехиздат, 1946
8. Л.И.Мандельштамм “О распространении волн”. Полное собрание трудов, т.Ш, стр. 369-396, Изд-во АН СССР, 1950
9. С.И.Ханкина, В.М.Яковенко “О возбуждении поверхностных электромагнитных волн в полупроводниках” ФТТ, 1967, т.9, №2, стр.578

10. С.И.Ханкина, В.М.Яковенко “К теории поверхностных волн в твердых телах” ФТТ, 1967, т.9, № 7, стр.2943
 11. В.В.Шевченко Радиотехника и электроника, 1969, т.14, №10, стр.1768
 12. В.В.Шевченко Плавные переходы в открытых волноводах, М, Наука, 1969
 13. В.И.Байбаков, В.Н.Дацко //“Поверхностные и неоднородные геликоновые волны в InSb”. В книге “Симпозиум по физике плазмы и электрическим неустойчивостям в твердых телах”, Вильнюс. 1971. с.51
 14. В.И.Байбаков, В.Н.Дацко, С.И.Ханкина, В.М.Яковенко // «Явление медленных поверхностных магнитоплазменных волн».
- Заявка на открытие № ОТ – 11849 от 28.06.88. Бюллетень изобретений М. 1988
15. В.И.Байбаков, В.Н.Дацко, Ю.В.Кистович // «Поверхностные электромагнитные волны в воде». Письма в ЖТФ. 1980. т.6. №7 с.394
 16. В.И.Байбаков, В.Н.Дацко, Ю.В.Кистович// «Экспериментальное обнаружение поверхностных электромагнитных волн Ценнека». Доклад на сессии отделения общей физики и астрономии РАН. «Успехи физических наук» 1989. №4. с.122.
 17. В.И.Байбаков, Ю.В.Кистович// «Поверхностные электромагнитные волны в плазме газового разряда». Физика плазмы.1981. Т 7. №1. с.192
 18. В.Н.Дацко, М.О. Суслов// «Поверхностные электромагнитные волны сверхвысоких частот в открытом волноводе» Радиотехника и электроника, 2013, т.58, №5, с 503-506
 19. Ю.Б.Башкуев, В.Б.Хаптанов, М.Г.Дембелов, И.Б.Нагуслаева// «Поверхностные электромагнитные волны в естественных условиях. Результаты эксперимента». III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г.
 20. D.A.Hill, J.R.Wait // Radio Science 1978. 13.p. 909
 21. Ф.Харвей //Техника СВЧ. «Советское радио». М.. 1965
 22. В.Е.Кашпровский, Ф.А.Кузубов// “Распространение средних радиоволн земным лучом” Издат-во “Связь “. М. 1971
 23. Barrick D.E. //“Theory of HF and VHF propagation across the rough sea”

Radio Science. 1971. v.6. №5. p.517

24. Microwaves 1980. IV. №4. p 54; Радиоэлектроника за рубежом информ. бюллетень 1980, вып.19(913), с.43.

25. Радиоэлектроника за рубежом 1983. № 5. с 34.

26. G.H. Millman, G.R. Nelson //IEEE International Radar Conference 1980, p.106.

27. Ю.В.Кистович// «О возможности наблюдения поверхностных волн.

Ценнека в излучении источника с малой вертикальной апертурой». ЖТФ. 1989. т.59. № 34.

28.В.Н.Дацко// «Локация надводных объектов поверхностными электромагнитными волнами» Радиотехника и электроника 2003. том 48. №8. с. 954.

29.В.Н.Дацко, А.А.Копылов.// Патент РФ № 48075 «Радиолокационная станция на поверхностных волнах» по заявке № 2005113146 от 29.04.2005г.

30.В.Н.Дацко, А.А.Копылов.// Патент РФ № 48076 «Радиолокационная станция на поверхностных волнах» по заявке № 2005113147 от 29.04.2005г.

31.В.Н.Дацко, А.А.Копылов// Патент РФ №57537 «Система связи на поверхностных волнах» по заявке №2006122489 от 23.06.06.

32. В.Н.Дацко, А.А.Копылов.// «Система связи на поверхностной волне».

Патент РФ № 57537 по заявке № 2007112276 от 02.04.2007 г.