

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ НАЛИЧИИ ВОЛНОВОДА ИСПАРЕНИЯ

И. М. Мыщенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ire@ire.kharkov.ua*

В районах Мирового океана определены дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн сантиметрового диапазона при наличии волновода испарения. Установлена эмпирическая зависимость между высотой волновода испарения и величиной множителя ослабления поля прямого сигнала на различных расстояниях. Предложена методика для определения основного параметра трасс распространения радиоволн – множителя ослабления, а также ее использование для диагноза и прогноза дальности действия судовых РЛС. Сопоставлены результаты диагноза дальности действия РЛС с экспериментальными данными. Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: распространение, волновод испарения.

Известно, что дальность действия зависит от условий распространения радиоволн радиотехнических систем разного назначения (радиолокации, навигации, связи и т. д.), характеризующихся дистанционной зависимостью множителя ослабления. Размещенные на судах антенные системы располагаются на небольшой высоте, и трассы распространения сигналов лежат в пределах действия волноводов испарения. По этим причинам исследование распространения радиоволн при наличии волновода испарения и выявление возможностей для эффективного его осуществления за горизонтом не теряют своей актуальности и представляют интерес для широкого круга специалистов [1, 2].

К настоящему времени в исследованиях распространения радиоволн сантиметрового диапазона над водной поверхностью достигнуты значительные успехи. Волноводы испарения фактически постоянно возникают непосредственно над поверхностью океана при наличии быстрого спада влажности с высотой и простираются от своей верхней границы до поверхности. Кроме этого, возможно распространение радиоволн во флуктуационном волноводе [3, 4]. Как в ранних работах [5, 6], так и в более поздних [7, 8, 9] сделаны выводы о том, что основной эффект волноводов испарения сводится к увеличению дальности действия радиотехнических систем с рабочими частотами более 3 ГГц. Проведенные эксперименты были сделаны на небольших расстояниях и в основном между островами или во внутренних морях. Однако увеличение интенсивности судоходства и действие флотов в различных районах Мирового океана требуют исследования распространения радиоволн сантиметрового диапазона далеко от материков и на расстояниях, в несколько раз превышающих радиогоризонт.

Целью данной работы является создание методики диагноза дальности действия судовых РЛС сантиметрового диапазона радиоволн и ее экспериментальная проверка. Использование созданной базы данных по множителям ослабления

радиоволн [10] трех и десятисантиметрового диапазонов в исследованных районах Атлантического, Индийского, Тихого и Северного Ледовитого океанов для неисследованных районов на расстояниях, превышающих радиогоризонт. Установление эмпирической зависимости между высотой волновода испарения и множителем ослабления радиоволн на различных расстояниях.

1. Аппаратура и методика измерений.

Значение множителя ослабления радиоволн трех и десятисантиметрового диапазонов на необходимых расстояниях бралось из базы данных [10]. Антенные системы приемного измерительного комплекса располагались на высотах 5,5; 17 и 22,5 м, а передающего - на высотах 4,5 и 12 м. Это давало возможность организовать три трассы распространения радиоволн.

Определение высоты волновода h_B производилось по методике, изложенной в работе [11] по данным стандартных гидрометеорологических измерений (СГМИ), которые производились каждый час на обоих судах.

Предельной дальностью обнаружения $r_{пред}$ считалось расстояние, на котором отраженный от цели сигнал $P_{П}$ становился равным собственным шумам приемника РЛС, т. е. $P_{П} = P_{Ш}$. Определение предельной дальности обнаружения $r_{пред}$ проводилось при расхождении судов, одно из которых являлось целью с известной эффективной площадью рассеяния σ ($\sigma_3 \approx 1500 \text{ м}^2$).

При схождении судов определение $r_{пред}$ не производилось из-за трудности обнаружения отраженного от цели сигнала на предельных дальностях.

Результаты экспериментальных исследований зависимостей множителя ослабления радиоволн трех и десятисантиметрового диапазонов от высоты волновода испарения h_B для расстояний 50, 75, 100, 150 и 200 км представлены на рис. 1.

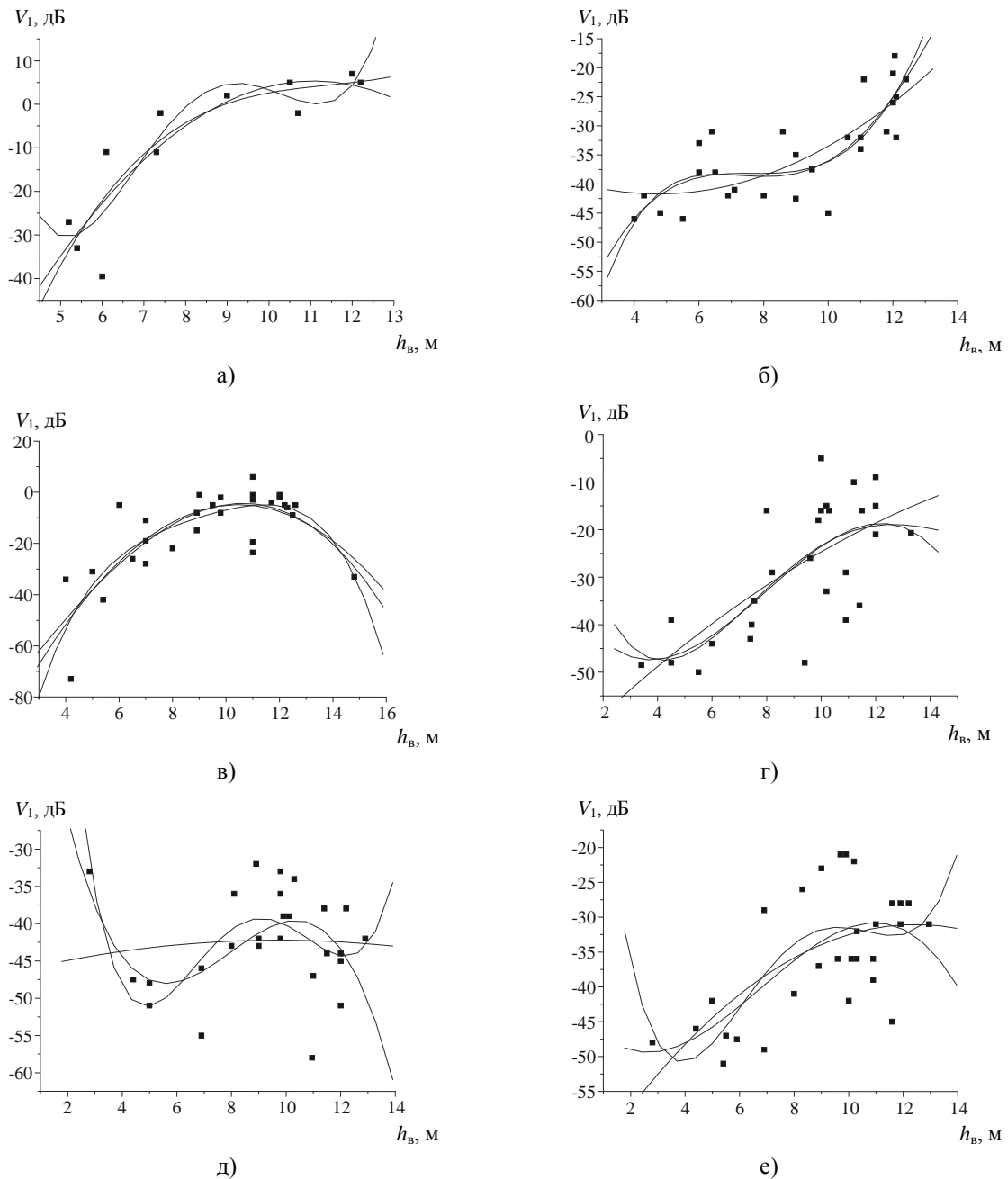


Рис. 1. Зависимость множителя ослабления V , дБ от высоты волновода испарения h_B , м ($h_1 = \text{const}$, $r = \text{const}$): а) $\lambda = 3$ см; $h_1 = 5,5$ м; $h_2 = 4,5$ м; $r = 50$ км; б) $\lambda = 10$ см; $h_1 = 17$ м; $h_2 = 12$ м; $r = 75$ км; в) $\lambda = 3$ см; $h_1 = 22,5$ м; $h_2 = 12$ м; $r = 75$ км; г) $\lambda = 3$ см; $h_1 = 22,5$ м; $h_2 = 12$ м; $r = 150$ км; д) $\lambda = 3$ см; $h_1 = 17$ м; $h_2 = 12$ м; $r = 200$ км; е) $\lambda = 3$ см; $h_1 = 22,5$ м; $h_2 = 12$ м; $r = 200$ км

2. Обработка результатов. Как видно из рис. 1, значения множителя ослабления для конкретных высот волноводов и расстояний имеет довольно большой разброс. Это связано прежде всего с точностью определения высоты волновода по стандартным судовым гидрометеозмерениям и временной нестабильностью приводного слоя тропосферы за время движения судов по длине трассы. В настоящее время отсутствуют какие-либо общепринятые представления о количественных характеристиках погрешностей проведения судовых

гидрометеозмерений в открытом океане при различных условиях и разных типов судов. Так, например, на судах малого тоннажа забрызгивание и качка будут влиять значительно сильнее, чем на крупнотоннажных судах, где большее значение будет приобретать нагрев корпуса судна и его искажающее влияние на ветровой поток. Для увеличения достоверности представленных зависимостей нами использовались данные, когда высоты волноводов, определенные на обоих судах, или были равны, или отличались на ± 1 м. Точность

определения множителя ослабления ± 1 дБ [12].

Кроме этого, наличие различного рода случайных факторов (флуктуаций коэффициента преломления, изменчивости формы морской поверхности и т. д.) вызывает рассеяние энергии на этих неоднородностях и приводит к затуханию сигнала [3, 4]. Эти факторы не учитывались, что также увеличило разброс множителей ослабления. Тем не менее, видимая общая закономерность зависимости $V = f(h_B)$ для трехсантиметрового диапазона просматривается на всех расстояниях 50, 75, 100, 150, 200 км. Для десятисантиметрового диапазона и реально существующих высот волноводов (2-12 м) в исследованных рай-

онах зависимость $V = f(h_B)$ слабо выражена.

Воспользуемся «методом наименьших квадратов» и попробуем установить зависимость $V = f(h_B)$, которая бы наилучшим образом изображала экспериментальную. Представим зависимости, изображенные на рис. 1, полиномом второй степени. Как видно, полином второй степени $V(h_B) = A + Bh_B + Ch_B^2$ хорошо совпадает с экспериментальными зависимостями и дает результат, не противоречащий работам [1-4]. Числовые параметры A , B , C этой зависимости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расстояние r , км	Длина волны λ , см	Высота антенн		Числовые параметры		
		h_1 , м	h_2 , м	A	B	C
50	3	5,5	4,5	-128,15	24,1	-1,0879
	3	17	12	-107,29	20,47	-0,982
	3	22,5	12	-78,65	15,417	-0,772
75	3	5,5	4,5	-117,975	18,94	-0,843
	3	17	12	-9,1	14,482	-0,6572
	3	22,5	12	-127,55	23,469	-1,1217
100	3	5,5	4,5	-105,9	13,37	0,51
	3	17	12	-76,57	8,05	-0,267
	3	22,5	12	-75,14	9,69	-0,35
150	3	5,5	4,5	-93,733	11,037	-0,482
	3	17	12	-73,64	6,67	-0,272
	3	22,5	12	-69,83	5,746	-0,123
200	3	5,5	4,5	-46,538	0,8845	-0,0454
	3	17	12	-68,31	5,979	-0,2399
	3	22,5	12			

Используя полученные выражения, мы можем восстановить дистанционную зависимость множителя ослабления $V(r)$ для трехсантиметрового диапазона радиоволн и различных высот волновода испарения h_B при различных числовых параметрах A , B , C , соответствующих различным высотам расположения антенных систем $h_1 = \text{const}$, $h_2 = \text{const}$. Для десятисантиметрового диапазона установить зависимость между множителем ослабления $V(r)$ и высотой волновода h_B не удастся из-за недостаточной высоты h_B волноводов испарения. Эксперименты проводились в различных районах Мирового океана, существенно отличающихся метеорологическим режимом [13]. Однако вероятность появления волноводного распространения радиоволн десятисантиметрового диапазона во всех районах была незначительной и не представляла интерес для практического применения. Таким образом, трехсантиметровый диапазон имеет преимущество перед десятисантиметровым, хотя и не является оптимальным для волноводного распространения над океанской поверхностью [5]. Ограничени-

ем применения полученных выражений является диапазон изменений $h_B = 4-12$ м. Нижний предел объясняется малой точностью определения h_B при низких волноводах испарения, а верхний предел - многомодовостью: по мере увеличения высоты волновода появляются осцилляции кривой $V(h_B)$, что не дает возможность ее аппроксимировать. Все большую роль начинает играть вторая мода, хотя ее ослабление и больше, чем у первой. При дальнейшем увеличении высоты волновода h_B процесс повторяется и преобладающими становятся моды все более высоких порядков.

На рис. 2 показаны восстановленные с помощью выражений $V(r) = A(r) + Bh_B(r) + Ch_B^2(r)$ дистанционные зависимости. Кривые 1-10, 1-8, 1-6, 1-4 представляют собой дистанционную зависимость $V(r)$ для $h_1 = 4,5$ м, $h_2 = 5,5$ м и высот волноводов испарения $h_B = 10, 8, 6$ и 4 м соответственно. Кривые 2-10, 2-8, 2-6, 2-4 для $h_1 = 17$ м, $h_2 = 12$ м и высот волноводов испарения $h_B = 10, 8, 6$ и 4 м, а кривые 3-10, 3-8, 3-6, 3-4 для $h_1 = 22,5$ м, $h_2 = 12$ м.

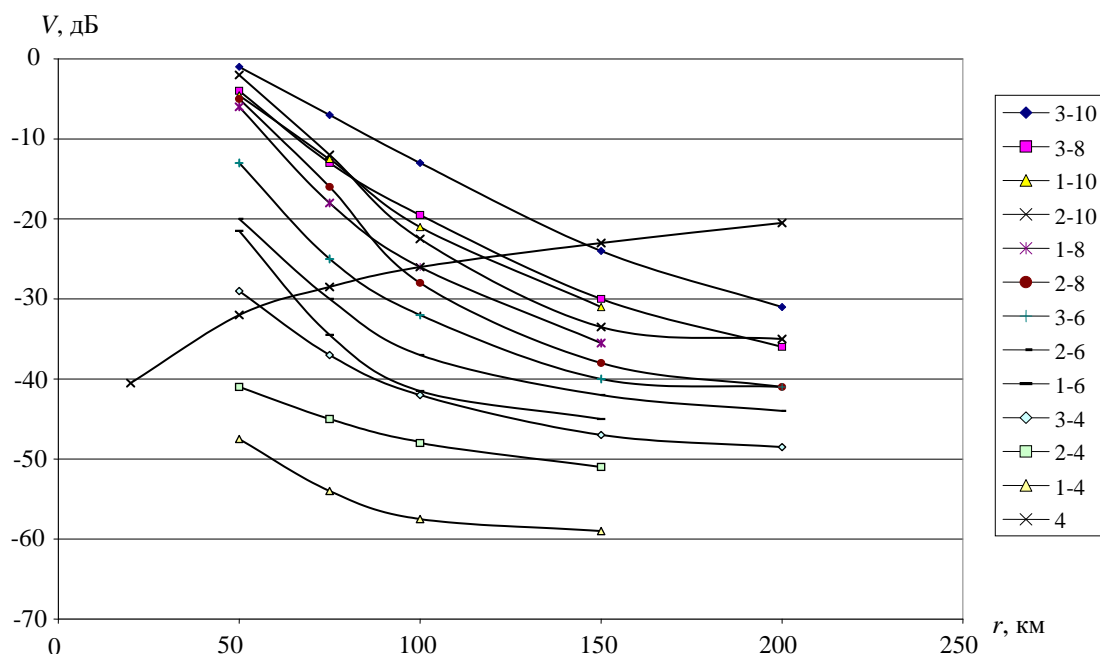


Рис. 2. Влияние зависимости $V(r)$ при $h_1=\text{const}$, $h_2=\text{const}$, $h_B=\text{const}$

Для определения дальности действия РЛС с использованием полученных $V(r)$ необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} V(r) = A(r) + B(r)h_B + C(r)h_B^2 \\ V_{\text{пред}}(r) = \sqrt{\frac{r^4}{C\sigma}} \end{cases}$$

где $h_B = \text{const}$; $r = \text{const}$; $h_1 = \text{const}$; $h_2 = \text{const}$; C - энергопотенциал РЛС, σ - эффективная площадь рассеяния надводного объекта.

Второе уравнение представляет собой зависимость предельного значения множителя ослабления $V_{\text{пред}}$, при котором возможно обнаружение надводного объекта на данном расстоянии. На

рис. 2 показана зависимость $V_{\text{пред}}(r)$ (кривая 4) для РЛС «МРЛ-5» ($C=216$ дБ) и эффективной площадью рассеяния надводного объекта $\sigma = 2000 \text{ м}^2$.

Проекции точек пересечения кривых 4 и 1, 2, 3 на ось дадут нам дальности действия «МРЛ-5» при различных высотах установки антенной системы и высотах волновода. Дальности действия, определенные описанным выше способом, а также экспериментальные значения дальностей действия, полученные на реальной РЛС «МРЛ-5», установленной на высоте $h=18$ м, представлены в табл. 2. Наиболее близкое совпадение наблюдается при использовании кривых 2 ($h_1 = 17$ м, $h_2 = 12$ м) и 3 ($h_1 = 22,5$ м, $h_2 = 12$ м).

Таблица 2

Высоты, м	Рассчитанное значение дальности действия «МРЛ-5» ($\sigma=2000 \text{ м}^2$)			Экспериментальное значение дальностей действия «МРЛ-5», км	Примечание
	$h_1=5,5$ м	$h_1=17$ м	$h_1=22,5$ м		
Антенных систем	h_2	h_2	$h_2=12$ м	$h=18$ м	
Волновода					
4	-	-	55	54, 54, 50, 52, 46, 52, 53, 48, 50, 50, 51, 59	«-» менее 50 км
6	62	67	78	63, 60, 65, 68, 69, 59, 60, 72	
8	92	92	120	95, 110, 115*	*танкер водоизмещением 100000 т
10	115	110	144	115	
Радиогоризонт, км	18,5	31	335	35	

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие важные для практики выводы.

Полученные зависимости $V(h_B) = A + Bh_B + Ch_B^2$ дают возможность по данным стандартных судовых гидрометеорологических измерений, которые можно проводить практически на каждом экспедируемом судне с помощью недорогостоящей измерительной аппаратуры, восстанавливать дистанционную зависимость множителя ослабления $V(r)$ и осуществлять оперативный диагноз дальности действия загоризонтных РЛС и радиотехнических устройств, работающих в трехсантиметровом диапазоне. Кроме этого, имеется возможность осуществлять долговременный прогноз с использованием соответствующих метеоанализов в интересующем районе Мирового океана.

Для эффективного использования волновода испарения антенную систему не обязательно помещать в самом волноводе. Как показали проведенные исследования (см. рис. 2), наиболее высокие уровни сигналов за пределами радиогоризонта получены высокорасположенными антеннами. Этот вывод не относится к зоне интерференции и расстояниям, близким к радиогоризонту.

1. Мыценко И. М., Роевко А. Н., Хоменко С. И. Диагностика и прогнозирование дальности действия судовых навигационных РЛС трехсантиметрового диапазона // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2001. - 6, № 1. - С. 67-71.
2. Richter J. H. and Hitney H. V. The effect of the evaporation duct on microwave propagation // Navel Electronics. Zab. Cen. Tech. Rep. - 1975. - No. 17. - P. 1949.
3. Фрейлихер В. Д., Фукс И. М. Влияние флуктуаций показателя преломления на ослабление поля в тропосферном волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. - 1981. - 24, № 4. - С. 408-414.
4. Иванов В. К., Лановой В. Н., Фрейлихер В. Д. Влияние флуктуаций параметров турбулентности на затухание волн в тропосферном волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. - 1989. - 32, № 3. - С. 255-266.
5. Anderson K. D. Evaporation duct effects on moderate range propagation over the sea at 10 and 1,7 cm wave lengths // Navel Ocean Syst. Cen. Tech. Rep. - 1982. - No. 19. - P. 858.
6. Steven, George S. Y, Carton J. A. A New Model of the Oceanic Evaporation Duct. Journal of applied meteorology. - 1997. - P. 193-203.
7. Rogers L. T. and Pauls R. A. "Measured performance of evaporation duct models". Proc. Battlspase Atmospherics Conference. 3-5 Dec 1996, NRaDTD2938 (ADA323038). - P. 1996.
8. Мыценко И. М., Панкратов Л. С., Хоменко С. И. Экспериментальное исследование дальности действия навигационных РЛС сантиметрового диапазона в районах

- Мирового океана. - Харків: Харківський військовий ун-т. - 2001. - Вип. 2(32). - С. 56-59.
9. Rotheram S. Radiowave propagation in the evaporation duct // The marooning Rev. - 1974. - 42. - P. 18-40.
 10. Костина В. Л., Мыценко И. М., Роевко А. Н., Хоменко С. И. Исследование ослабления радиоволн УКВ диапазона в районах Мирового океана // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2007. - 12, № 3. - С. 532-539.
 11. Гаврилов А. С., Петров Ю. С. Методы расчета структуры приводного слоя атмосферы применительно к задачам радиолокации над океаном // Рассеяние и дифракция радиолокационных сигналов и их информативность. - Л.: СЗПИ. - 1984. - С. 31-36.
 12. Радиофизические исследования мирового океана / Под ред. В. Б. Разказовского. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1992. - 220 с.
 13. Мыценко И. М. Дистанционные зависимости множителя ослабления радиоволн метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов в районах Мирового океана // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2006. - 11, № 3. - С. 393-400.

INVESTIGATION OF THE CM-RADIO WAVE PROPAGATION AT EXISTING EVAPORATION DUCT

I. M. Mytsenko

The distance dependences of cm-radio wave attenuation factor at existing evaporation duct in different regions of the World Ocean are determined. The empirical dependence between evaporation duct height attenuation factor value for direct field signal at different distances is obtained. The methodical for determination of the main parameter of radio wave propagation path, i.e. attenuation factor, is proposed. Some questions, on this methodical application for diagnosis and prediction of the navigation radar detection range are discussed.

Key words: propagation, evaporation duct.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЗА НАЯВНОСТІ ХВИЛЕВОДУ ВИПАРЮВАННЯ

І. М. Миценко

В районах Світового океану визначені дистанційні залежності множника ослаблення радіохвиль сантиметрового діапазону за наявності хвилеводу випарювання. Встановлено емпіричну залежність між висотою хвилеводу випарювання та величиною множника ослаблення поля прямого сигналу на різних відстанях. Запропоновано методику для визначення основного параметру трас поширення радіохвиль - множника ослаблення, а також її використання для діагнозу та прогнозу дальності дії судових РЛС. Зіставлені результати діагнозу дальності дії з експериментальними даними.

Ключові слова: поширення, хвилевод випарювання.

Рукопись поступила 1 марта 2008 г.