

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, РАДИОЛОКАЦИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

УДК 537.86:546.212

Ю. И. Малышенко, А. Н. Роечко

ЧАСТОТНЫЙ ХОД КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ В ДОЖДЯХ ПРИ УЧЕТЕ МЕЛКОКАПЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ В ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЖДЕВЫХ КАПЕЛЬ ПО РАЗМЕРАМ

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

Показано, что большинство функций распределения дождевых капель по размерам, используемых при прогнозировании качества работы микроволновых радиолокационных и связных систем в дождевых условиях недостаточно точно отражают реальное количество мелких капель. Для коротковолновой части миллиметрового и терагерцевого диапазонов волн предложена новая функция распределения, учитывающая наличие мелких дождевых капель. С учетом полученного распределения рассчитаны коэффициенты ослабления излучения в дождях разной интенсивности. Ил. 4. Табл. 5. Библиогр.: 37 назв.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокация, радиосвязь, функция распределения дождевых капель по размерам, терагерцевый диапазон электромагнитных волн.

В настоящее время достаточно хорошо изучено влияние дождей на распространение радиоволн как микроволнового (1÷300 ГГц) [1–3], так и оптического [4, 5] диапазона. Между ними, в обширной области терагерцевых частот, в том числе в субмиллиметровом (субмм) диапазоне волн, до сих пор нет надежных теоретических и экспериментальных данных. Последнее обстоятельство связано с отставанием развития технической базы для этого диапазона, а недостаток теоретических прогнозов, по нашему мнению, обусловлен неточностью функций распределения капель по размерам, используемых в этих прогнозах [6–13]. Важность функций распределения капель по размерам становится понятной, если вспомнить, что с точки зрения математики коэффициенты ослабления и рассеяния излучения в дождях являются суммами произведений сечений Ми отдельных капель на количество капель в единице объема дождя с учетом их распределения по размерам. Для использования в микроволновом диапазоне волн имеется несколько надежных и проверенных функций распределения капель по размерам (Маршалла-Пальмера (*M-P*), Лоуса-Парсонса (*L-P*), логнормальные и Γ -распределения) [14–18]. Но применять вышеперечисленные функции распределения в субмм диапазоне уже некорректно, так как в них не заложена информация о мелких дождевых каплях (с диаметром 0,05÷0,6 мм), поскольку в период накопления указанных распределений не существовало технических средств регистрации таких мелких капель. В микроволновом диапазоне этот недостаток известных распределений не проявляется. Мелкие капли здесь значительно меньше длины волны и ими можно пренебречь. С переходом на более высокие частоты субмм диапазона именно эти мелкие капли по размерам совпадают с длиной волны, и

в них возникают известные резонансы Ми, также они оказывают достаточно сильное воздействие на электромагнитное излучение. Наглядно это подтверждает перенесенный из миллиметрового (мм) диапазона в субмм численный эксперимент Ватсона [19] для гипотетического дождя, состоящего только из одних мелких капель (рис. 2 [20]). Из него видно, что вклад мелких капель в коэффициенты ослабления сравним с вкладом всех остальных более крупных капель. Это, в частности, приводит к тому, что в субмм диапазоне более чем в микроволновом приемлема сферическая модель дождевых капель, поскольку заметно снижается удельный вклад в полидисперсное сечение дождя заведомо асферичных крупных капель на фоне возросшего вклада мелких и средних, форма которых близка к сферической.

Итак, в терагерцевом диапазоне учет мелких дождевых капель становится обязательным, однако экспериментальных данных по ним крайне мало. В значительной степени это связано с трудностями регистрации и подсчета мелких капель в кюветах с касторовым маслом. Этот метод, введенный К. С. Шифриным и Е. И. Поляковой [21], впоследствии был усовершенствован в Японии [22] и в Китае [23]. Проведенный анализ показал, что разброс данных Е. И. Поляковой не позволяет их использовать в расчетах коэффициентов ослабления и рассеяния радиоволн в дождях с приемлемой точностью. Данные китайских исследователей, к сожалению, не доступны научной общественности. Остается только один источник качественно измеренных и вполне статистически обеспеченных данных – результаты японских исследователей Угаи и Като [22] (измерено около 1 000 спектров размеров мелких и средних дождевых капель для интенсивностей дождя до 50 мм/ч, рис. 1).

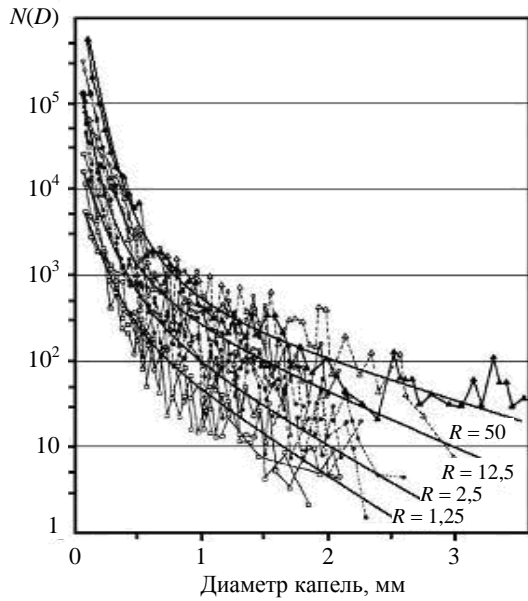


Рис. 1. Результаты измерений Угаи-Като [22]. Значения интенсивности дождя R , мм/ч: —▲— 46,4; - -△- - 32,2; —◇— 5,6...7,1; - -◆- - 3,6...5,6; —○— 0,3...1,1

Для использования в наших вычислениях эти данные были сгруппированы по четырем значениям интенсивности дождя ($R = 50; 12,5; 2,5$ и $1,25$ мм/ч) и аппроксимированы показательными функциями $N(D) = 10^x$, где x представлен полиномами 5-й степени $x = x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i D^i$. Значения коэффициентов функций аппроксимации для каждого значения интенсивности дождя приведены в табл. 1.

Напомним, что методика работы [22] предусматривает регистрацию очень мелких дождевых капель, составляющих мелкокапельную фракцию в полном спектре размеров капель, и тем самым дополняет распределения, широко используемые в микроволновом диапазоне. Составленное таким образом полное распределение было предложено в работе [20]. Однако впоследствии было решено вместо примененного в работе [20] логнормального распределения для крупнокапельной фракции использовать распределение $L-P$, поскольку получается более гладкая стыковка двух указанных кривых в одно единое распределение дождевых капель по размерам. В отличие от [20], в настоящей работе выражение для распределения $L-P$ взято не в редакции де Вольфа [24], а рассчитано на основании оригинальных данных авторов [15] по формуле

$$N(D)\Delta D = 0,01061 \frac{R\rho}{D^3V} \text{ м}^{-3}\text{мм}^{-1},$$

где R – интенсивность дождя, мм/ч; ρ – доля воды, содержащаяся в каплях определенного диаметра D , в процентном отношении к полному объему воды, выпавшей в виде осадков; D – средний диаметр капли, мм; V – скорость падения капель определенного диаметра, м/сек. Для дальнейшего использования полученные зависимости были также аппроксимированы показательными функциями $N(D) = 10^x$, где x представлен полиномами 5-й степени $x = x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i D^i$.

Значения коэффициентов функций аппроксимации для каждого значения интенсивности дождя приведены в табл. 2.

Таблица 1

R , мм/ч	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1,25	3,97769	-5,70064	6,16487	-3,91386	1,21948	-0,148
2,5	4,39421	-5,80242	5,34394	-2,77957	0,70553	-0,06955
12,5	5,38862	-6,92546	6,12275	-2,87308	0,65191	-0,05719
50	6,20516	-8,15193	7,40471	-3,48361	0,79336	-0,06992

Таблица 2

R , мм/ч	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1,25	3,04791	-0,1952	-0,99759	0,30003	-0,03725	0,00171
2,5	3,22338	-0,48696	-0,5565	0,14532	-0,01517	$5,817 \cdot 10^{-4}$
12,5	3,49301	-0,78032	-0,04391	$-5,837 \cdot 10^{-4}$	$4,273 \cdot 10^{-4}$	$2,306 \cdot 10^{-5}$
50	4,17983	-2,08024	1,11286	-0,3708	0,05376	-0,00285

Таким образом, для нового составного распределения возьмем указанные выше аппроксимации результатов измерений Угаи-Като [22] и

оригинальных данных авторов [15]. На рис. 2 представлены графики этих зависимостей для значения интенсивности дождя $R = 50$ мм/ч.

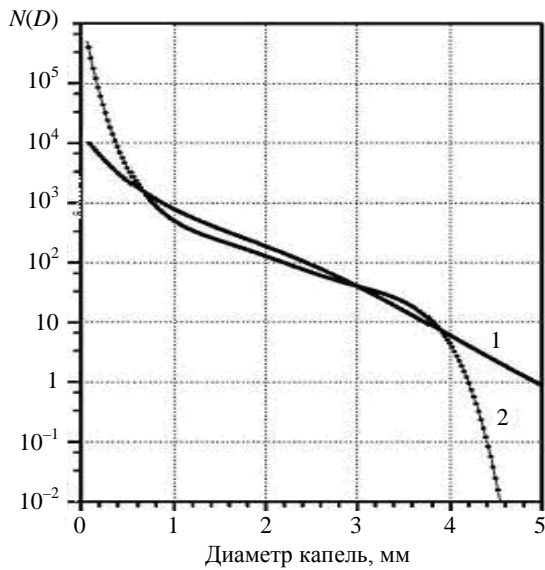


Рис. 2. Оригинальное распределение *L-P* по данным авторов [15] (кривая 1) и аппроксимация результатов измерений Угаи-Като [22] для интенсивности дождя $R = 50$ мм/ч (кривая 2)

Видно, что кривые пересекаются в трех точках, поэтому можно использовать различные алгоритмы получения составного распределения. Для очень мелких капель, до первой точки пересечения графиков, мы используем данные Угаи-Като [22], а далее – данные авторов [15]. Графики новых аппроксимированных зависимостей для

разных значений интенсивности дождя приведены на рис. 3. Значения коэффициентов функций аппроксимации для каждого значения интенсивности дождя представлены в табл. 3 (аналогично приведенному выше $N(D) = 10^x$, где

$$x = x_0 + \sum_{i=1}^5 x_i D^i.$$

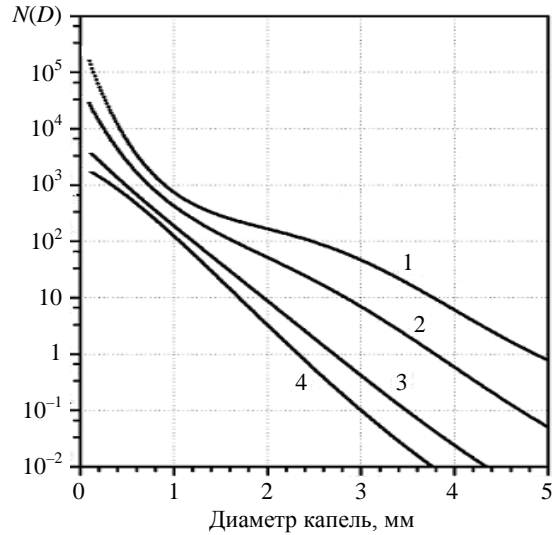


Рис. 3. Аппроксимации предложенных распределений для разных значений интенсивности дождя R : 1 – 50 мм/ч; 2 – 12,5 мм/ч; 3 – 2,5 мм/ч; 4 – 1,25 мм/ч

Таблица 3

$R, \text{ мм/ч}$	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1,25	3,34853	-0,88614	-0,49395	0,14255	-0,01518	$5,699 \cdot 10^{-4}$
2,5	3,75713	-1,68475	0,30543	-0,12206	0,0221	-0,00134
12,5	4,76601	-3,4707	1,82872	-0,56947	0,07861	-0,00396
50	5,66987	-5,1273	3,19411	-0,99552	0,13891	-0,00716

Теперь, используя полученные распределения (рис. 3), а также приведенные ранее в работе [25] уточненные значения комплексной диэлектрической проницаемости капельной воды в субмм диапазоне, получаем возможность уточ-

нения теоретических прогнозов [6–12] в отношении степени воздействия дождей на субмм излучение. Результаты вычислений коэффициентов ослабления в дождях для температуры 20°C представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

$F, \text{ ГГц}$	Затухание, дБ/км, при $R = 50$ мм/ч		Затухание, дБ/км, при $R = 12,5$ мм/ч	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
3000	22,13		7,51	
1000	24,41	23,5 [26]	8,25	9,1 [26]
600	25,14		8,67	
360	24,93		8,81	
300	24,97	19÷21 [27]	8,92	6,5÷8,0 [27]
200	23,74	19÷21 [27]	8,65	7,8÷8,8 [28]
100	19,95	19÷21 [29, 30, 31]	7,10	6,5÷8 [29, 31, 35]
60	16,48	15÷18 [29, 32]	5,21	5,8÷6,2 [29, 32]
37,5	11,75	11÷12,5 [27, 29, 33]	3,00	2,9÷3,5 [29, 33, 34]

Таблица 5

F , ГГц	Затухание, дБ/км, при $R = 2,5$ мм/ч		Затухание, дБ/км, при $R = 1,25$ мм/ч	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
3000	2,25		1,35	
1000	2,47	2,6 [26]	1,49	1,6 [26]
600	2,62		1,59	
360	2,72		1,65	
300	2,77	2,0÷2,5 [27]	1,69	1,3÷1,6 [27]
200	2,73	2,2÷2,6 [37]	1,67	1,4÷1,65 [37]
100	2,18	1,9÷2,3 [31, 35]	1,30	1,1÷1,4 [29, 31]
60	1,37	1,5÷1,7 [29, 32]	0,75	0,85÷0,95 [32]
37,5	0,60	0,65÷0,72 [29, 37]	0,30	0,32÷0,36 [29, 32]

На рис. 4 показана зависимость погонного затухания волн субмм диапазона в дожде с интенсивностью $R = 50$ мм/ч. Кривые 1, 2 и 3 представляют данные из работ [10], [12] и [3] соответственно, 4 – расчет авторов для распределения $L-P$ дополненного данными по малым каплям из работы [22]. Точками (•) на рисунке представлены экспериментальные данные из источников, указанных в табл. 4 и 5.

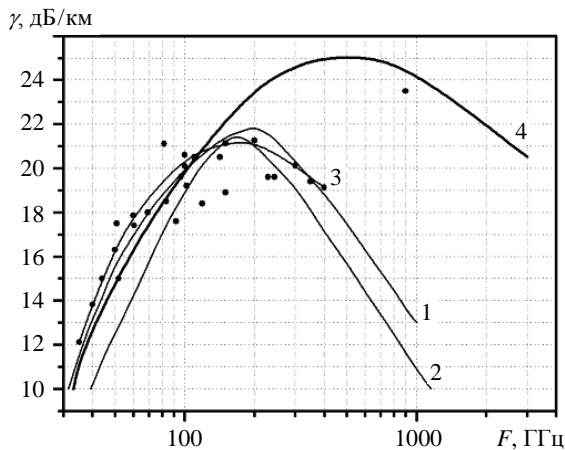


Рис. 4. Погонное затухание волн субмм диапазона в дожде с интенсивностью $R = 50$ мм/ч

Выводы. Таким образом, предложено новое распределение дождевых капель по размерам $N(D)$ для терагерцевого диапазона волн. В области мелких капель это распределение опирается на опубликованные экспериментальные данные Угаи-Като [22], а в области средних и крупных – на оригинальное распределение $L-P$ [15]. Учет мелкокапельной фракции приводит к увеличению коэффициентов ослабления в терагерцевом и в коротковолновой части мм диапазонов. Проведенный расчет дает удовлетворительное совпадение с существующими экспериментальными данными при разных значениях интенсивности дождя R .

1. Medhurst R. G. Rainfall attenuation of centimeter waves: comparison of theory and measurement / R. G. Medhurst //

- IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1965. – 13, N 4. – P. 550–564.
2. Усиков А. Я. Поглощение и рассеяние радиоволн в осадках / А. Я. Усиков, В. Л. Герман, И. Х. Ваксер // Укр. физ. журн. – 1961. – 6, № 5. – С. 618–641.
 3. Recommendation ITU-R P. 838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2005.
 4. Бисярин В. П. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / В. П. Бисярин, А. В. Соколов. – 1977. – 175 с.
 5. Соколов А. В. К вопросу об ослаблении видимого и ИК излучения в дождях и снеге / А. В. Соколов // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 12. – С. 2463–2467.
 6. Соколов А. В. К вопросу ослабления субмиллиметровых радиоволн в дождях / А. В. Соколов, Е. В. Сухонин // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 12. – С. 2454–2458.
 7. Розенберг В. И. Радиолокационные характеристики дождя в субмиллиметровом диапазоне радиоволн / В. И. Розенберг // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 12. – С. 2443–2450.
 8. Наумов А. П. Об ослаблении миллиметровых и субмиллиметровых волн в дождях / А. П. Наумов, В. С. Станкевич // Изв. вузов. Радиофизика. – 1969. – 12, № 2. – С. 181–185.
 9. Ваксер И. Х. О влиянии дождя на распространение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / И. Х. Ваксер, Л. Е. Копилович, Ю. И. Малышенко // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1970. – 6, № 9. – С. 956–959.
 10. Sekine M. Rain attenuation of centimeter, millimeter and submillimeter waves / M. Sekine, G. Lind // 12th European Microwave Conf.: proc. – Helsinki, 1982. – P. 584–589.
 11. Sayama S. Influence of raindrop-size distributions on the differential reflectivity up to submillimeter wavelength of 0,96 mm / S. Sayama, M. Sekine // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2002. – 23, N 5. – P. 775–784.
 12. Сухонин Е. В. К проблеме распространения миллиметровых волн в осадках / Е. В. Сухонин // Успехи радиоэлектрон. – 2002. – № 9. – С. 72–79.
 13. Ishii S. Rain attenuation at Terahertz / S. Ishii, S. Sayama, K. Mizutani // Wireless Engineering and Technology. – 2010. – 1, N 2. – P. 92–95.
 14. Marshall J. S. The distribution of raindrop with size / J. S. Marshall, W. M. Palmer // J. of Meteorology. – 1948. – 15, N 1. – P. 165–166.
 15. Laws J. O. The relation of raindrop-size to intensity / J. O. Laws, D. P. Parsons // Trans. American Geophys. Union. – 1943. – 24, pt. II. – P. 452–460.
 16. Best A. C. The size distribution of raindrops / A. C. Best // Quarterly J. Royal Meteorology Soc. – 1950. – 76, N 327. – P. 16–21.
 17. Modeling raindrop size distribution and Z(R) relation in the Western Mediterranean Area / C. Cerro, B. Codina, J. Bech, J. Lorente // J. Applied Meteorology. – 1997. – 36, N 11. – P. 1470–1479.

18. Feingold G. The lognormal fit to raindrops spectra from frontal convective clouds in Israel / G. Feingold, Z. Levin // J. Climate and Applied Meteorology. – 1986. – 25. – P. 1346–1368.
19. Watson P. A. Propagation factors in millimeter-wave radio-system design / P. A. Watson, C. Eng // Electronics and Power. – 1977. – 23, N 7. – P. 569–572.
20. Малышенко Ю. І. Учет мелкокапельной фракции в функции распределения дождевых капель по размерам для терагерцевого диапазона волн / Ю. І. Малышенко, А. Н. Роечко // Радиопизика и электрон.: сб. научн. тр. / Ин-т радиопизики и электрон. НАН Украины. – 2009. – 14, № 3. – С. 323–330.
21. Полякова Е. А. Микроструктура и прозрачность дождей / Е. А. Полякова, К. С. Шифрин // Тр. Главной геофиз. обсерватории. – 1953. – Вып. 42. – С 84–96.
22. Ugai S. Fine structure of rainfall / S. Ugai, K. Kato // Annales des Telecommunications. – 1977. – 32, N 11–12. – P. 422–429.
23. Huang J. Y. Measurements of raindrop sizes and canting angles / J. Y. Huang, C. Wang // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. – 1989. – 10, N 9. – P. 1112–1130.
24. De Wolf D. A. On the Laws-Parsons distribution of raindrop sizes / D. A. de Wolf // Radio Sci. – 2006. – 36, N 4. – P. 639–642.
25. Малышенко Ю. І. Модель діелектричної проникності води в мікрохвильовому і терагерцевому діапазонах волн / Ю. І. Малышенко, В. Л. Костина, А. Н. Роечко // Укр. физ. журн. – 2007. – 52, № 2. – С. 155–164.
26. Zlewellyn-Jones D. T. Rainfall attenuation at 110 GHz and 0,88 THz / D. T. Zlewellyn-Jones, A. M. Zavody // Electronics Letter. – 1971. – 7, N 12. – P. 321–322.
27. Бабкин Ю. С. Измерение ослабления в дождях / Ю. С. Бабкин, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 12. – С. 2451–2453.
28. Ваксер И. Х. Измерение коэффициента поглощения в дождях / И. Х. Ваксер, Ю. І. Малышенко // Изв. вузов. – 1971. – 14, № 6. – С. 958–960.
29. Gibbins C. J. A 500 μ experimental range for propagation studies / C. J. Gibbins, D. G. Carter // J. of Inst. of Electronics and Radio Eng. – 1987. – 57, N 5. – P. 227–234.
30. Utsunomiya T. Rain attenuation at 103 GHz / T. Utsunomiya, M. Sekine // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2005. – 26, N 11. – P. 1651–1660.
31. Zhao J. Rain attenuation at millimeter wave range / J. Zhao, J. Li // 7th Intern. Symp. Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – 2006. – (4 p.).
32. Asen W. A. A novel method for predicting rain attenuation / W. A. Asen, T. Tjelta // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2003. – 51, N 10. – P. 2987–2999.
33. Norbury Y. R. Microwave attenuation at 35,86 GHz due to rainfall / Y. R. Norbury, W. J. K. White // Electronics Letters. – 1972. – 8, N 4. – P. 91–92.
34. Watson P. A. Survey measurements of attenuation by rain / P. A. Watson // Proc. IEEE. – 1976. – 123, N 9. – P. 863–871.
35. Ho K. L. Rain induced attenuation / K. L. Ho // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1978. – 26, N 6. – P. 873–875.
36. Harrold T. W. Attenuation of 8,6 mm waves in rain / T. W. Harrold // Proc. IEEE. – 1967. – 114, N 2. – P. 201–203.
37. Weibull raindrop-size distribution and its application from 30 GHz to 1000 GHz / M. Sekine, S. Ishii, S. I. Hwang, S. Sayama // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2007. – 28, N 5. – P. 383–392.

Рукопись поступила 20.07.2011.

Yu. I. Malysenko, A. N. Roenko

FREQUENCY DEPENDENCE OF MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVE ATTENUATION COEFFICIENT IN RAINS AT ACCOUNTING OF SMALL DROPLETS IN RAIN DROP SIZE DISTRIBUTION FUNCTION

It is shown that most of probability density distributions of rain drop sizes, widely used in calculations of rain attenuation statistics for microwave radar and communication systems, describe the real quantity of the rain small droplets rather inaccurately. New more adequate distribution function, which takes into account small droplets, is proposed. Taking into account the new distribution the radiation attenuation in rains of different intensity is calculated.

Key words: remote sensing, radar, radio communication, rain drop size distribution function, terahertz frequency range.

Ю. І. Малышенко, О. М. Роечко

ЧАСТОТНИЙ ХІД КОЕФІЦІЄНТА ПОСЛАБЛЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО І СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ В ДОЩАХ ПРИ ВРАХУВАННІ ДРІБНОКРАПЕЛЬНОЇ ФРАКЦІЇ У ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ДОЩОВИХ КРАПЕЛЬ

Показано, що більшість функцій розподілу дощових крапель за розміром, які використовуються при прогнозуванні якості роботи мікрохвильових радіолокаційних і зв'язних систем в дощових умовах, недостатньо точно відбивають реальну кількість дрібних крапель. Для короткохвильової частини міліметрового і терагерцевого діапазону хвиль запропоновано нову функцію розподілу, що враховує наявність дрібних дощових крапель. З урахуванням отриманого розподілу розраховано коефіцієнти послаблення випромінювання в дощах різної інтенсивності.

Ключові слова: дистанційне зондування, радіолокація, радіозв'язок, функція розподілу дощових крапель за розмірами, терагерцевий діапазон електромагнітних хвиль.