

СТАТИСТИКА ДАЛЬНОСТИ РЛС В ГИДРОМЕТЕОРАХ

Р. П. Быстров, А. В. Соколов, Л. В. Федорова

Институт радиотехники и электроники РАН

Получена 10 июля 2012 г.

Аннотация. Предложен статистический метод оценки дальности действия РЛС в тропосфере с учетом одновременного влияния ослабления радиоволн в гидрометеорах и молекулярного поглощения в атмосферных газах. На основе этого метода рассчитаны вероятностные распределения ослабления миллиметровых волн в дождях по усредненным за 23 года данным метеоизмерений статистик выпадения дождей различной интенсивности в средней полосе Европейской территории России. С учетом рассчитанных статистик ослабления в гидрометеорах (дождь, туман, дождевая облачность), а также молекулярного поглощения в парах воды и нерезонансного поглощения в кислороде методом математического моделирования получены вероятностные распределения дальности действия РЛС на пяти длинах миллиметрового диапазона волн: 8,2; 6; 3,2; 2,5 и 1,42 мм. Проведено сравнение дальности действия РЛС в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн.

Ключевые слова: дальность действия РЛС; данные многолетних измерений дождя, тумана; вероятностное распределение; гидрометеорное распределение; поглощение в водяном паре; нерезонансное поглощение в кислороде.

Abstract. We propose a statistical method for estimating the range of radar distance in the troposphere, taking into account the simultaneous effect of attenuation of radio waves in the hydrometeors and the molecular absorption of atmospheric gases. On the basis of this method, calculated probability distribution of the attenuation of millimeter waves in rains averaged for 23 years according to statistics of rainfalls of varying intensity in the mid-band of European territory of Russia. Taking into account the calculated statistics of attenuation in hydrometeors (rain, fog, rainy clouds), as well as molecular absorption of water vapor and non-resonant absorption in oxygen, by methods of mathematical simulation-ray derived probability distribution ranges of radar distances in five millimeter wave lengths: 8.2, 6, 3.2, 2.5 and 1.42 mm. A com-

parison of radar distances in decimeter, centimeter and millimeter wavelengths is given.

Keywords: radar operating distance; rain intensity; absorption of radio waves in water vapor; probability distribution; attenuation in hydrometeors; non-resonant absorption in oxygen.

Введение

В течение ряда лет в ИРЭ РАН проводятся исследования ослабления миллиметровых волн (ММВ) в тропосфере применительно к созданию перспективных радиолокационных систем на основе передовых новейших технологий.

Теоретически и экспериментально исследовано ослабление радиоволн в дождях и других гидрометеорах (туманах, облаках). Молекулярное поглощение в парах воды и нерезонансное поглощение в кислороде. Изучена статистика удельного поглощения в парах воды в зависимости от широты места [1,2]. На основе теории квантовой механики рассчитаны вероятностные распределения удельного поглощения в водяном паре в окнах прозрачности атмосферы на волнах 8,2 и 3,2 мм для субтропического, умеренного и континентального климата на 42, 56 и 69° с.ш. Согласно расчетам отношение коэффициента поглощения, соответствующего 1% времени к его значению, соответствующему 50% времени, на обеих длинах волн изменялась с ростом широты места в интервале от 1,8 до 2,7. Это свидетельствует о возможности обеспечения большей дальности действия миллиметровых РЛС в северных широтах по сравнению с южными.

Результаты теоретических расчетов ослабления ММВ в дождях, выполненные на основе теории однократного рассеяния с применением различных моделей распределения капель по размерам, соответствовали экспериментальным данным только на коротких трассах. На трассах сравнительно большей протяженности наблюдалось расхождение теории с экс-

периментом из-за пространственной и временной неоднородности дождей.

С целью выработки единого подхода к исследованию влияния гидрометеоров и атмосферных газов на работу РЛС в ИРЭ РАН предложен статистический метод оценки дальности действия РЛС по усредненным статистическим данным многолетних метеонаблюдений за изменением атмосферных факторов. Метод позволяет учесть одновременное влияние на дальность действия РЛС гидрометеорного ослабления и молекулярного поглощения.

На первоначальном этапе с помощью этого метода рассчитаны и исследованы статистические распределения ослабления миллиметровых (ММ), сантиметровых (СМ) и дециметровых (ДМ) волн в дождях с учетом их временной и пространственной неоднородности [3-5]. Расчеты выполнены на основе усредненных за 23 года данных о вероятности выпадения дождей различной интенсивности в средней полосе Европейской территории России.

Далее для всех указанных диапазонов рассчитаны и исследованы вероятностные распределения полного суммарного ослабления радиоволн в тропосфере за счет одновременного влияния статистик ослабления в дождях, дождевых облаках и туманах, а также статистик поглощения в водяном паре и нерезонансного поглощения в кислороде.

По результатам этих исследований выполнены статистические оценки дальности действия тропосферных РЛС миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов волн и приведен сравнительный анализ преимущественного влияния статистик отдельных метеофакторов на статистику полного ослабления и статистику дальности действия РЛС в различных диапазонах волн.

1. Дальности действия РЛС миллиметрового диапазона волн

Для удобства сравнения параметров РЛС на различных длинах волн уравнение дальности действия РЛС можно представить в виде [3]:

$$\alpha = \frac{\ln \left[\Pi \left(\frac{d^2}{8\lambda} \right)^2 \frac{\pi\sigma}{4 \cdot 10^6} \pi\sigma \right]}{2R} - \frac{2 \ln R}{R}, \quad (1)$$

где α - полное ослабление сигнала в атмосфере в дБ/км; Π - потенциал РЛС, равный отношению мощности, излучаемой в антенну, к чувствительности приемника; d - диаметр апертуры антенны в м; λ - длина волны в мм; R - длина трассы в км; σ - эффективная поверхность рассеяния объекта в кв.м.

Уравнение (1) позволяет учитывать одновременное влияние на величины дальности РЛС поглощения в парах воды и в кислороде, ослабления в туманах, а также ослабления в дождях, которые на ММВ является наиболее сильным зависимым от длины трассы [4].

На рис.1 показаны статистики ослабления в дождях в умеренном климатическом поясе для длин волн 8,2 и 3,2 мм.

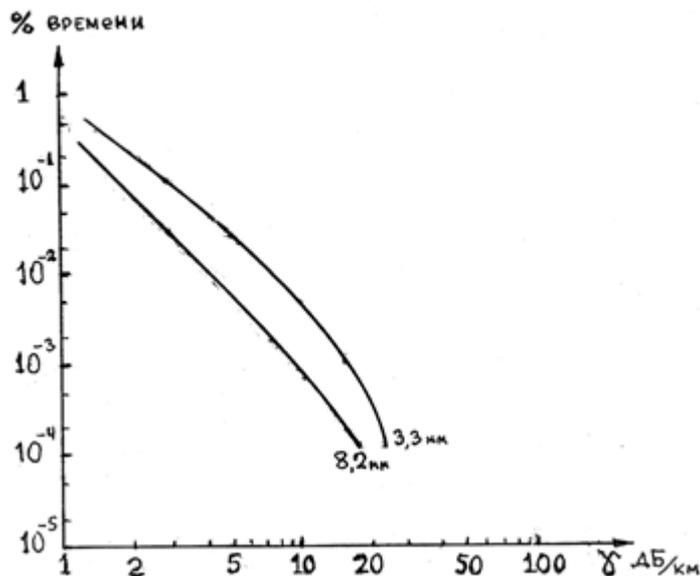


Рис. 1. Временные распределения ослабления в дождях на волнах 8,2 и 3,2 мм.

Статистики ослабления рассчитаны на основе усредненных за 23 года метеоизмерений процентов времени выпадения дождей различной интенсивности в интервалах 1-100 мм/ч в средней полосе Европейской территории России. По оси абсцисс отложено ослабление в дБ/км, по оси ординат – усредненное время в % в течение которого ослабление за период года равно или меньше значения,

указанного абсциссой. Из рис.1 следует, что вероятность выпадения дождей с интенсивностью 1-100 мм/ч для средней полосы Европейской территории России находится в пределах $0,8 \cdot 10^{-4}$ % времени. Усредненные статистики вероятности выпадения дождей для расчета статистик ослабления могут быть получены для разных климатических районов. Для Севера и Средней Азии такие усредненные статистики представлены в [5].

На основе предложенного метода расчета статистик ослабления радиоволн в тропосфере по усредненным данным многолетних измерений статистик метода параметров методом математического моделирования проведена оценка вероятностных распределений дальности действия миллиметровых РЛС для средней полосы Европейской территории России [1-4].

Для оценки влияния на дальность действия РЛС были приняты типичные параметры миллиметровых РЛС: мощность передатчика 1 Вт, чувствительность приемника 10^{-16} Вт/Гц, потенциал РЛС 10^{15} , длительность импульса 1 мкс, отношением сигнал/шум 10 дБ, диаметр антенны 1 м. ЭПР цели принималась равной 1 м^2 .

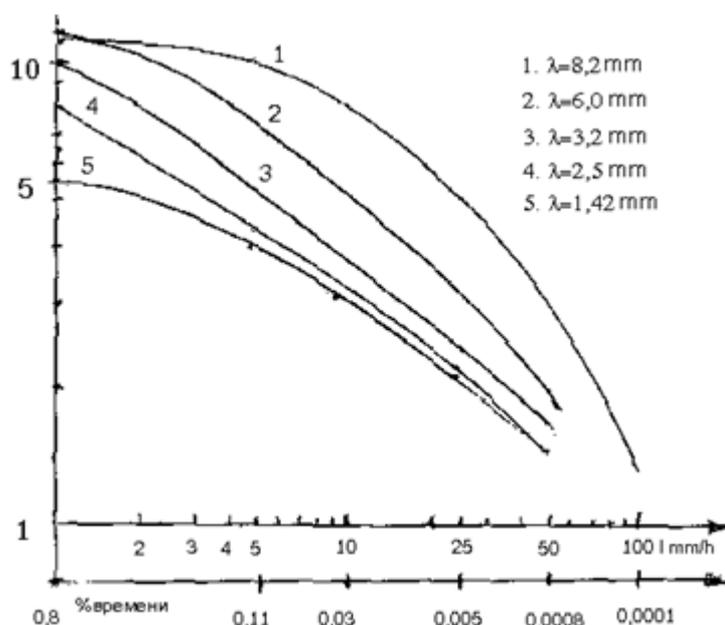


Рис. 2. Вероятностные распределения дальности действия РЛС в суммарного поглощения на миллиметровых волнах.

На рис. 2 представлены результаты оценок статистик дальностей РЛС ММВ для пяти длин волн: 8,2; 6,0; 3,2; 2,5 и 1,42 мм с учетом молекулярного поглощения в парах воды, нерезонансного поглощения в кислороде и статистик ослабления в дождях и туманах [3,6].

По оси абсцисс отложен процент времени, в течение которого дальность действия РЛС за период года не превышает значения, указанного ординатой (R, км). На оси абсцисс указаны также значения интенсивности дождя в мм/ч, соответствующие определенному проценту времени.

Анализ результатов моделирования дальности действия РЛС на рис.2 показывает, что на волнах 8,2; 6,0; 3,2; 2,5 и 1,42 мм при интенсивностях дождя до 5 мм/ч наблюдается небольшое уменьшение дальности РЛС с уменьшением длины волны. При этом на длинах волн в 8,2 и 3,2 мм обеспечиваются дальности РЛС до 12 и 5 км соответственно.

В центрах линий поглощения паров воды и кислорода (волны 1,64 и 5 мм) дальность действия РЛС из-за большого молекулярного поглощения существенно уменьшается.

По формуле Релея оценено влияние статистики туманов с различной оптической видимостью на дальность действия миллиметровых РЛС на волнах 8,2 и 3,2 мм. Результаты оценок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Дальность действия РЛС в туманах с различной оптической дальностью видимости (в км и % уменьшения ее по отношению дальности в чистой атмосфере)

| Длина волны, мм. | Оптическая видимость в тумане, м. | | | | | Дальность РЛС в чистой атмосфере, км |
|------------------|-----------------------------------|-----------|------------|------------|------------|--------------------------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | |
| 8,2 | 10,4 км | 14 км | 16,2 км | 17,0 км | 17,1 км | 17,8 км |
| | 57% | 70 % | 89% | 93% | 96% | |
| 3,2 | 5,5 км | 7,3 км | 11,5 км | 14,0 км | 15, км | 17,8 км |
| | 30% | 40% | 65% | 76% | 82% | |

Из табл.1 следует, что сильные туманы (дальность видимости 50-100 м) уменьшают дальность действия РЛС на волне 8,2 мм до 57-70 % и на волне 3,2

мм до 30-40 % по сравнению с её значениями в чистой атмосфере. При оптической дальности видимости порядка 1000 м снижение дальности РЛС на волнах 8,2 и 3,2 мм не превышает соответственно 4 и 18 %.

2. Дальность действия РЛС на дециметровых и сантиметровых волнах

На основе предложенного метода расчета статистик ослабления радиоволн в тропосфере и соотношения (1) проведен сравнительный анализ влияния молекулярного поглощения и гидрометеорного ослабления на дальность действия РЛС дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

В целях сравнения для всех диапазонов были приняты одинаковые параметры РЛС: потенциал систем $\Pi = 3 \cdot 10^{15}$ и диаметр круглого параболоида антенны 8 м. Эффективная поверхность рассеяния цели была принята равной 50 м^2 . Ослабление определялось в соответствии уравнению (1) для длин волн 100, 30, 10 и 3 см. Интенсивность дождей вдоль трассы предполагалась однородной.

Для определения дальности действия РЛС с учетом полученных значений ослабления α уравнение (1) решалось методом интерполяции.

Влияние молекулярного и гидрометеорного ослабления на этих волнах согласно (1) представлено в табл. 2, где приведены величины дальности действия РЛС за счет поглощения в водяном паре и нерезонансного поглощения в кислороде, а также ослабления в дождях.

Таблица 2.

Влияние молекулярного поглощения и гидрометеорного ослабления на дальность действия дециметровых и сантиметровых РЛС (в %относительно дальности действия в 100 км)

| <i>Поглощение, ослабление</i> | <i>Длина волны 30 см</i> | <i>Длина волны 10см</i> | <i>Длина волны 3см</i> |
|--|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <i>Пары воды + кислород</i> | 9,5% | 14,6% | 25,5% |
| <i>Туман с видимостью 50 м.</i> | 0% | 0% | 7,3% |
| <i>Дождь с интенсивностью 5 мм/ч</i> | 0% | 15,2% | 84,8% |
| <i>Дождь с интенсивностью 100 мм/ч + ослабление в дождевом облаке.</i> | 4,8% | 38% | 95,7% |

Результаты оценок дальности действия РЛС даны в табл.2 в процентах относительно дальности действия 100 км, где полное молекулярное и особенно нерезонансное поглощение в кислороде, ослабление в туманах и дождях слабо влияют на дальность действия РЛС в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн и практически не влияют на её значения в диапазоне метровых волн. Согласно оценкам наиболее сильные туманы с видимостью 50 м, не вызывают заметного уменьшения дальности действия РЛС на ДМ и СМ волнах. Наибольшее изменение дальности действия РЛС имеет место при ливневых дождях с интенсивностью 100 мм/ч.

Заключение

1. Предложен статистический метод оценки дальности действия тропосферных РЛС с учетом одновременного влияния ослабления радиоволн в гидрометеорах и молекулярного поглощения в атмосферных газах. Метод основан на расчете вероятностных распределений ослабления по усредненным данным многолетних метеоизмерений статистик содержания в атмосфере водяного пара и кислорода, а также статистик гидрометеоров.

2. С помощью этого метода получены вероятностные распределения дальности действия миллиметровых РЛС на длинах волн 8,2; 6,0; 3,2; 2,5 и 1,42 мм с учетом годового распределения суммарного ослабления, обусловленного усредненными за много лет годовыми статистиками ослабления в дождях и туманах, поглощения в водяном паре и нерезонансного поглощения в кислороде.

3. Установлено, что при одновременном учете молекулярного поглощения и ослабления в дождях интенсивностью ~ 5 мм/ч на волнах 8,2 и 3,2 мм обеспечиваются дальности действия РЛС соответственно в 12 и 5 км.

4. В сильных туманах с оптической видимостью 50-100 м дальность действия РЛС относительно её значения в чистой атмосфере (17,8 км) составляет соответственно на волне 8,2 мм 57-70% и на волне 3,2 мм – 30-40%. В туманах

с оптической видимостью ~ 1000 м, снижение дальности действия РЛС на волнах 8,2 и 3,2 мм не превышает соответственно 4 и 18%.

5. Проведено сравнение дальности действия РЛС в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн на основе расчета распределений ослабления в дождях и туманах, молекулярного поглощения в водяном паре и нерезонансного поглощения в кислороде на волнах 3, 10, 30 и 100 см.

6. На длинах волн более 30 см влияние на дальность действия РЛС молекулярного поглощения, ослабления в туманах и ослабления в дождях интенсивностью до 5 мм/ч пренебрежимо мало и его можно не учитывать.

7. Уменьшение дальности действия РЛС в ливнях интенсивностью ~ 100 мм/ч относительно дальности действия в 100 км на волне 30 см не превышает 5 %.

Литература

1. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В., Федорова Л.В., Чеканов Р.Н. Проблемы распространения и применения миллиметровых радиоволн в радиолокации. // Успехи современной электроники, 1997, № 1. –с. 4-20.

2. Соколов А.В., Чеканов Р.Н. Пространственно-временная изменчивость коэффициентов поглощения водяного пара в миллиметровом диапазоне волн. // Труды 8 Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», 26-31 мая 2002 г., Красновиново, Московской обл. – с. 65-66.

3. Быстров Р.П., Соколов А.В., Чеканов Р.Н. Дальность действия миллиметровых РЛС в дождях. //Радиотехника, № 1, 2005. –с. 19-24.

4. Соколов А.В. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере Земли. // М.: Итоги науки и техники. Серия «Радиотехника», т.5, 1974. –с. 5-109.

5. Соколов А.В., Сухонин Е.В. Ослабление миллиметровых радиоволн в толще атмосферы. // М.: Итоги науки и техники. Серия «Радиотехника», т. 20. – с. 107-204.

6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. //М.: Сов. Радио, 1962. – 403 с.