

## **ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТАТИСТИКА ДАЛЬНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ РЛС В ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЕ**

*А.В.Соколов, Р.Н.Чеканов*

Институт радиотехники и электроники РАН

*Статья посвящена исследованию статистики дальности миллиметровых РЛС в условиях чистой атмосферы в парах воды.*

*This article investigates statistics of radars distance in pure atmosphere with water vapors attenuation.*

В настоящее время миллиметровые волны находят все более широкое применение в системах ближней и дальней радиолокации в приземном слое атмосферы и космосе, а также при скрытой локации и широкополосной связи [1,2,3]. Несмотря на многие теоретические и экспериментальные исследования коэффициентов поглощения в парах воды и кислорода, выполненные в последние годы, как в России, так и за рубежом, до сих пор задача об определении временных параметров сигнала на трассах распространения с заданной точностью (сигнал/шум, дальность действия системы и вероятность искажений сигналов) решается приближенно. При этом находятся лишь средние по времени значения при достаточно благоприятных условиях распространения. Причина этого кроется в том, что тропосфера является средой, диэлектрическая проницаемость газов которой в чистой атмосфере претерпевает в зависимости от пространства, времени года, суток и метеорологических условий непрерывные быстрые и медленные изменения, что в свою очередь постоянно меняет условия распространения излучения в атмосфере.

В значительном проценте времени года в атмосфере существуют также гидрометеоры, которые достаточно сильно изменяют коэффициенты ослабления распространяющегося излучения в миллиметровом диапазоне волн. Наконец, вихревые потоки порождают в атмосфере турбулентные вихри, приводящие к пульсациям диэлектрической проницаемости воздуха, что обуславливает флуктуации амплитуд и фаз распространяющегося излучения. Поэтому точное определение параметров такой среды, какой является атмосфера, с ее постоянной изменчивостью в пространстве и во времени весьма затруднительно.

До сих пор было исследовано значительное количество моделей распространения излучения с учетом особенностей параметров среды. Необходимо отметить, что в России и за рубежом средние значения коэффициентов поглощения паров воды в чистой атмосфере в миллиметровом диапазоне радиоволн длительное время изучались, как теоретически, так и экспериментально, и количественные результаты этих работ опубликованы в литературе [4-7]. Однако до сих пор статистически широтные зависимости миллиметровых РЛС не оценивались.

Целью настоящей работы явилась попытка учета временной, пространственной годовой изменчивости абсолютной влажности воздуха в чистой атмосфере.

Рассмотрение влияния основных метеорологических элементов атмосферы на коэффициенты поглощения паров в воздухе проводится в предположении, что величины абсолютной влажности, измеренные станциями гидрометеослужбы в

приземном слое воздуха репрезентативны в некоторой окрестности этих станций. По оценкам метеорологов такая репрезентативность может наблюдаться на расстояниях в единицы и десятки километров от этих станций.

Величины погонного поглощения в водяном паре в окнах прозрачности или в центрах линий поглощения могут быть представлены в соответствии с ударной моделью квантово-механического поглощения в парах воды согласно работы [4-6].

$$\gamma = 10^6 \lg e \frac{32\pi N \mu_0^2}{3hcG(T)} \sum_{i,j} \left( \frac{1}{\lambda^2} \right) \frac{\beta_{i,j}}{\lambda_{i,j}} \left| e^{-\frac{v_i hc}{kT}} - e^{-\frac{v_j hc}{kT}} \right| x \times \frac{0,9 \left( \frac{\Delta v}{c} \right)^{H_2O-N_2} \frac{P}{760} \left( \frac{T}{300} \right)^{-n_{i,j}}}{\left[ \left( \frac{1}{\lambda_{i,j}} \right)^2 - \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 \right]^2 + 4 \left[ 0,9 \left( \frac{\Delta v}{c} \right)^{H_2O-N_2} \frac{P}{760} \left( \frac{T}{300} \right)^{-n_{i,j}} \right]^2 \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $v_i$  и  $v_j$  – энергетические термы вращательных состояний молекулы воды,  $N$ -число молекул в единице объема, число Авогадро  $N_0=6,02472 \times 10^{23}$  г×моль<sup>-1</sup>, молекулярный вес  $\eta=18$ , средний дипольный момент молекулы  $\mu_0 = 1,87 \times 10^{-18}$  CGSE,  $\beta_{i,j}$  – дипольный момент молекулы, абсолютная влажность  $\rho = 7,5$  г/м<sup>3</sup>, постоянная Планка  $h = 6,6252 \times 10^{-27}$  эрг×сек, постоянная Больцмана  $k = 1,38042 \times 10^{-16}$  эрг/град.

Число молекул в единице объема определяется по формуле:

$$N = \frac{N_0}{\eta} \rho 10^6, \text{ где число } N_0 = 6,02472 \times 10^{23} \text{ г/моль}^{-1}. \text{ Заметим, что здесь все}$$

величины формулы (1) представлены в системе CGSE.

Выражение (1) хорошо описывает частотную зависимость коэффициентов поглощения в парах воды, а также их зависимость от влажности, температуры и давления во всем диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн, что было проверено на многочисленных экспериментах.

К. А. Аганбекян сравнивал теоретическую зависимость поглощения в водяном паре по (1) от влажности с экспериментом. На рис.1 [5], где прямыми линиями обозначена зависимость  $\gamma$  по формуле (1) от величины  $\rho$ , точками представлены результаты измерений на волнах 0,45; 0,56; 0,75; и 0,88 мм.

Таким образом, формула (1) была проверена на эксперименте в коротковолновом диапазоне, где влияние соседних крыльев линий на суммарный коэффициент поглощения в водяном паре становится весьма значительным. Из приведенного сравнения следует, что величина  $\gamma$  прямопропорциональна величине абсолютной влажности  $\rho$  в миллиметровом диапазоне волн. Следует, однако, заметить, что выражение (1) дает уменьшенные абсолютные величины поглощения по сравнению с опытом в связи, с чем на величины  $\gamma$  нами были введены поправочные коэффициенты на основе работ [7] для полного соответствия с экспериментом.

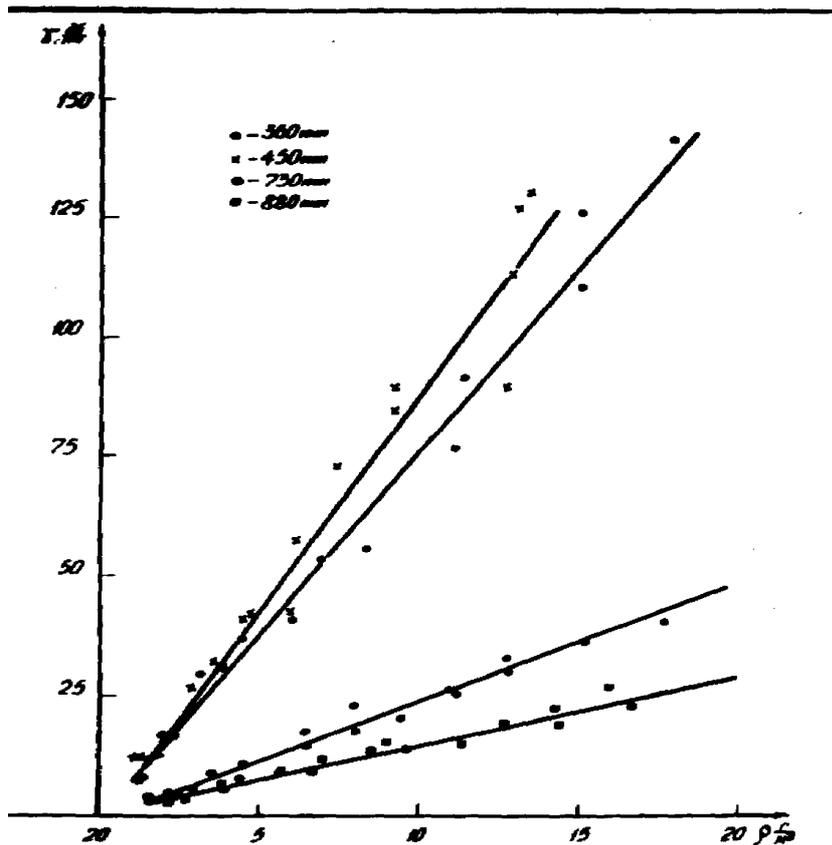


Рис.1. Поглощение в водяном паре. Теория и экспериментальные т.т.

Для оценки изменчивости коэффициентов поглощения в парах воды в окнах прозрачности миллиметрового диапазона, были приняты следующие значения удельного поглощения при нормальных условиях:  $\gamma=0,05$  дБ/км на волне 8,2 мм;  $\gamma=0,063$  дБ/км на волне 6 мм;  $\gamma=0,053$  дБ/км на волне 3,2 мм и  $\gamma=2,5$  дБ/км на волне 1,42 мм.

Для анализа изменений абсолютной влажности воздуха во времени и пространстве была проведена статистическая обработка данных о приземных значениях  $\rho$  за один год по данным метеостанций гидрометслужбы, расположенных вблизи различных районов (Батуми), (Москва), (Мурманск) в северных широтах. Всего нами было обработано свыше 4000 измерений, на основе которых были построены распределения абсолютной влажности за время одного года. Заметим, что данные измерений абсолютной влажности с помощью психрометров Ассмана являлись результатом осреднения  $\rho$  за период 5 минут, точность же этих измерений была не хуже  $0,1 \text{ г/м}^3$ .

По выражению (1) были найдены распределения коэффициентов поглощения водяного пара в окнах прозрачности в миллиметровом диапазоне волн для субтропического, умеренного и континентального климата. Зависимости величин  $\gamma$  от процента времени уменьшения коэффициентов поглощения значений  $\gamma$ , указанных ординатой, показаны на рис. 2 и 3 для 8,2 мм. и 3,2 мм. на  $42^\circ$ ,  $56^\circ$  и  $69^\circ$  с.ш.

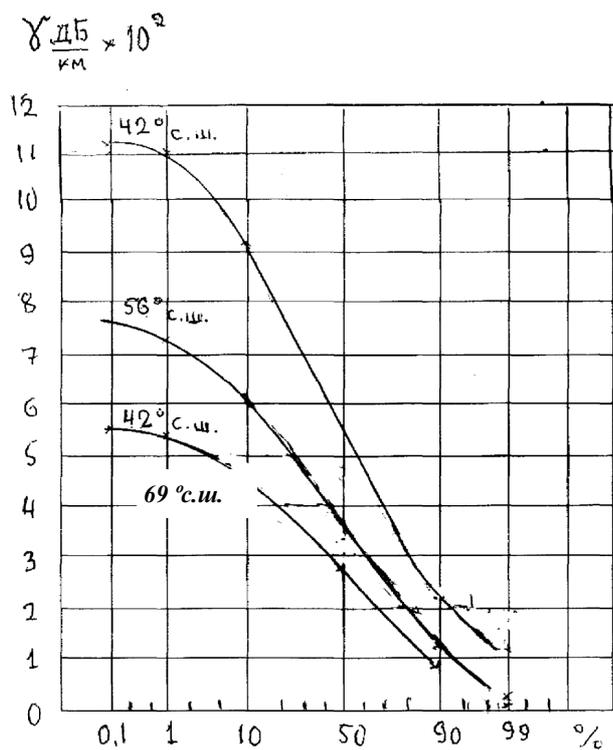


Рис.2 Среднегодовые распределения поглощения в парах воды на волне 8,2 мм и на 42° с.ш., 56° с.ш. и 69° с.ш.

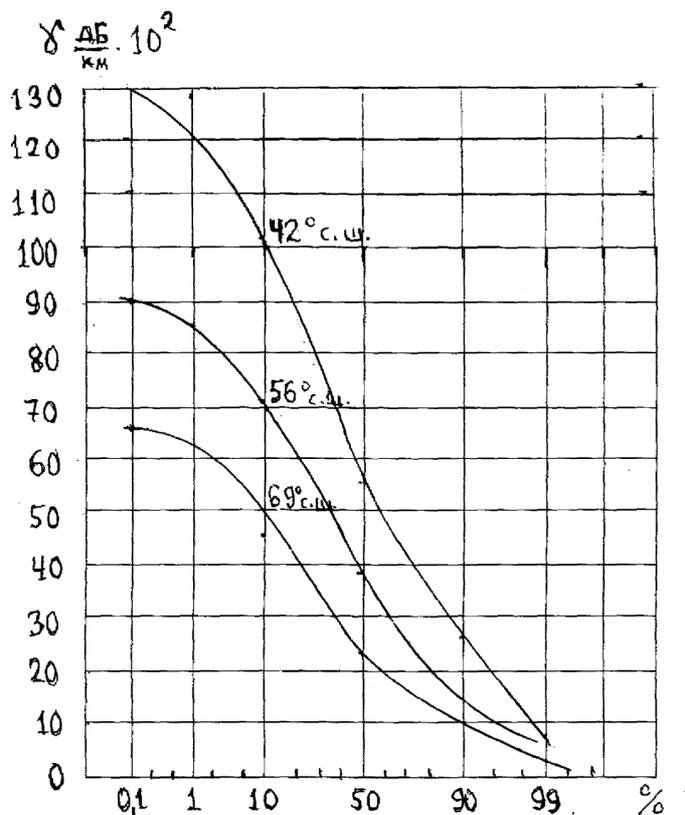


Рис.3 Средне-годовые распределения поглощения в парах воды на волне 3,2 мм и на 42° с.ш., 56° с.ш. и 69° с.ш.

Из приведенных данных отчетливо видно, что распределения коэффициентов поглощения в парах воды в чистой атмосфере за год по данным измерений абсолютной влажности сильно различаются для выше указанных широт и длин волн. При этом абсолютная величина коэффициента поглощения на 3,2 мм больше, чем на 8,2 мм. Согласно кривым распределения отношение коэффициентов поглощения, соответствующих отношению 1% уровня к 91% уровню, изменялось на выше указанных волнах и широтах в интервале от 4 до 6 раз, в то время как это же отношение для 1% уровня к 50% уровню (среднегодовому значению) достигало до 1,8 - 2,7 раз.

Кривые распределений коэффициентов поглощения в парах воды приближенно позволяют оценивать время превышения тех или иных значений  $\gamma$  во времени.

Оценки ослабления на трассах радиолокации и радиосвязи приводятся, как правило, для стандартной атмосферы при нормальных условиях, когда абсолютная влажность  $\rho=7,5$  г/м<sup>3</sup>,  $P=760$  мм. рт. ст. и  $T=286$  К. При этом нивелируются сезонные изменения поглощения. Для учета влияния изменчивости коэффициента поглощения в парах воды в чистой атмосфере на дальность обнаружения объектов нами было проведено моделирование дальности действия радиолокационных систем на волнах 8,2, 6,0, 3,2 и 1,42 мм с учетом данных о статистике величин поглощения в парах воды, приведенных на рис. 2 и рис. 3.

При этом предполагалось, что РЛС обладает в миллиметровом диапазоне волн следующими характеристиками: мощность передатчика 1 Вт, чувствительность приемника  $10^{-16}$  Вт/Гц, потенциал РЛС  $10^{15}$ , длительность импульса 1 мкс, отношение сигнал/шум 10 дБ, диаметр антенны 1м и ЭПР цели  $1\text{м}^2$ .

Результаты моделирования влияния изменчивости поглощения в парах воды на дальность действия РЛС показаны с учетом данных на рис. 2 и 3 на рис. 4, 5 и 6. При этом нами были учтены также коэффициенты нерезонансного поглощения в кислороде на указанных длинах волн. Для удобства сравнения параметров РЛС на различных длинах волн можно использовать трансцендентную форму уравнения дальности РЛС при учете молекулярного поглощения в парах воды:

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

где  $\Pi$  - потенциал РЛС, равный отношению мощности, излучаемой в антенну к чувствительности приемника,  $d$ - диаметр апертуры параболоида в м.,  $\lambda$ -длина волны в мм,  $R$ -расстояние в км,  $\sigma$  - эффективная поверхность рассеяния объекта в кв.м.

Согласно уравнению (1) одновременно на ММВ волнах может учитываться влияние поглощения в парах воды и в кислороде на величины дальности РЛС, зависящее от длины трассы [7].

Рассмотрим эти результаты подробнее. На рис 4 представлена статистика дальности РЛС на волне 8,2 мм в первом окне прозрачности для трех различных широт места  $42^\circ$  с.ш.,  $56^\circ$  с.ш. и  $69^\circ$  с.ш. и при среднем (50%) значении дальности РЛС. Этим широтам соответствовали значения дальности РЛС в 17,2 км, 17,6 км и 18 км. Для 1% времени, в течение которого дальности РЛС равны

или меньше значений ординат, составили на тех же широтах 15,3 км., 16,6 км и 17,4 км., для 90% времени, в течение которого дальности РЛС равны или больше значений ординат, составили 18,8, 18,6, 18,5 км.

Анализ кривых распределения дальностей обнаружения цели, проведенный по уровням, соответствующим 0,1% и 91 % времени, показал, что на всех широтах из-за возрастания в летнее время или убывания в зимнее время коэффициента поглощения в парах воды имеет место уменьшение или увеличение дальности РЛС. Однако эти колебания невелики и не превышают 8-20% от величины дальности РЛС.

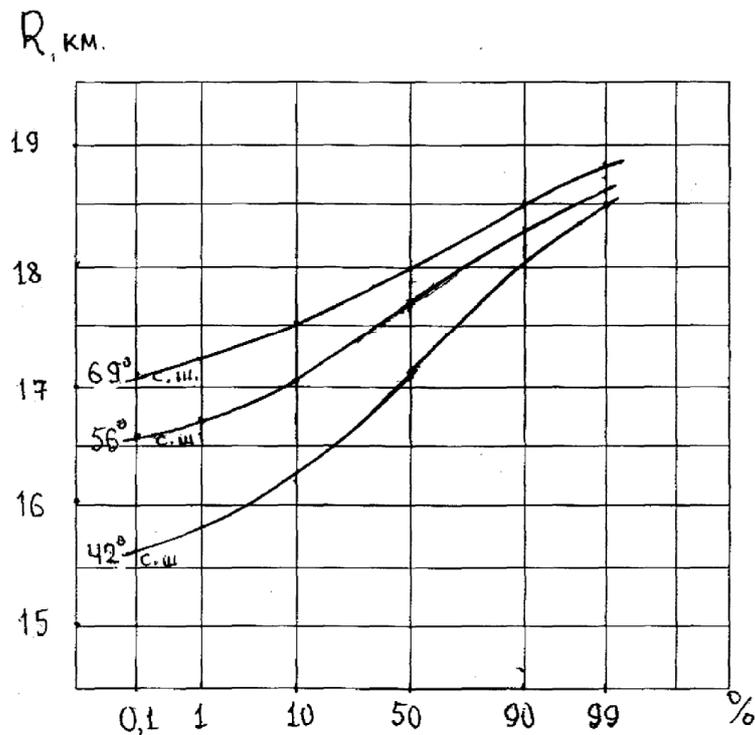


Рис 4

Рис 4 Дальности действия РЛС на волне 8,2 мм для трех широт и дальностей РЛС, равных и меньших значений ординат.

На Рис. 5 показаны зависимости дальностей РЛС на широте 56° на длинах волн: 1 - 8,2 мм, 2 - 6 мм, 3 - 3,2 мм, 4 - 1,43 мм.

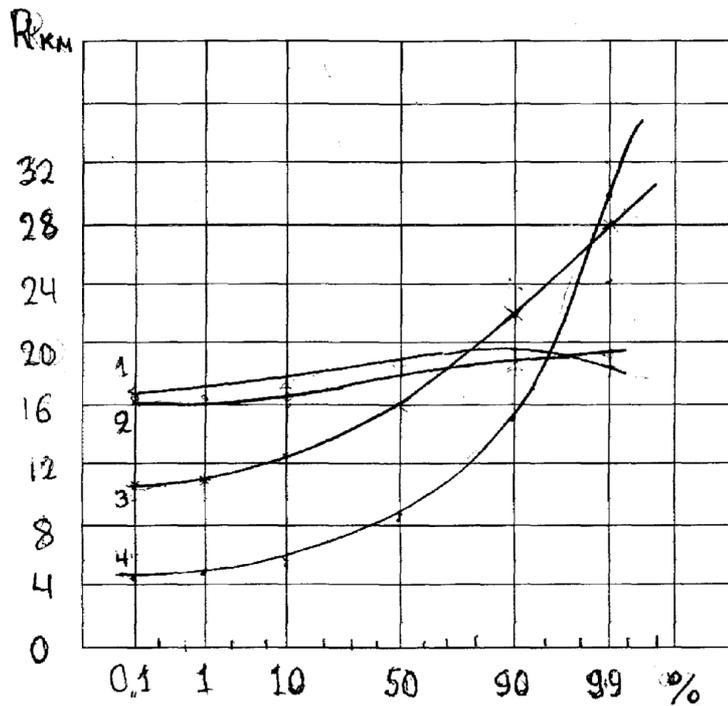


Рис 5 Дальность действия РЛС на широте  $56^\circ$ , равная и меньшая значений ординаты на длинах волн : 1 - 8,2 мм, 2 - 6 мм, 3 – 3,2мм, 4 - 1,43 мм.

На Рис.5 приведены результаты моделирования влияния изменчивости коэффициентов ослабления в парах воды обнаружения цели РЛС на длинах волн 8,2; 6,0; 3,2 и 1,43 мм. в климатическом поясе, соответствующем широте в  $56^\circ$  с.ш. Анализ кривых распределения дальностей обнаружения цели, проведенный по уровням, соответствующим 0,1% и 91 % времени, показал, что на всех длинах волн ( $1-\lambda=8,2$  ;  $2-\lambda=6,0$  мм;  $3-\lambda=3,2$  мм;  $\lambda=1,43$  мм) в окнах прозрачности миллиметрового диапазона волн также имеет место летом уменьшение дальности обнаружения, а зимой ее увеличение. При этом среднегодовые значения дальностей РЛС составили 18,5, 17,5, 16 и 14,5 км соответственно. Однако, для волн 8,2 и 6,0 мм эти колебания не выходят за пределы 23% относительно среднегодовой дальности. Кривые распределений дальностей 1 и 2 близки друг к другу из-за влияния коэффициента усиления антенны на волне 6 мм, компенсирующее увеличенное поглощение в парах воды. Для длин волн со значительным ослаблением дальность обнаружения летом и зимой изменяется на 15-35% от среднегодового значения.

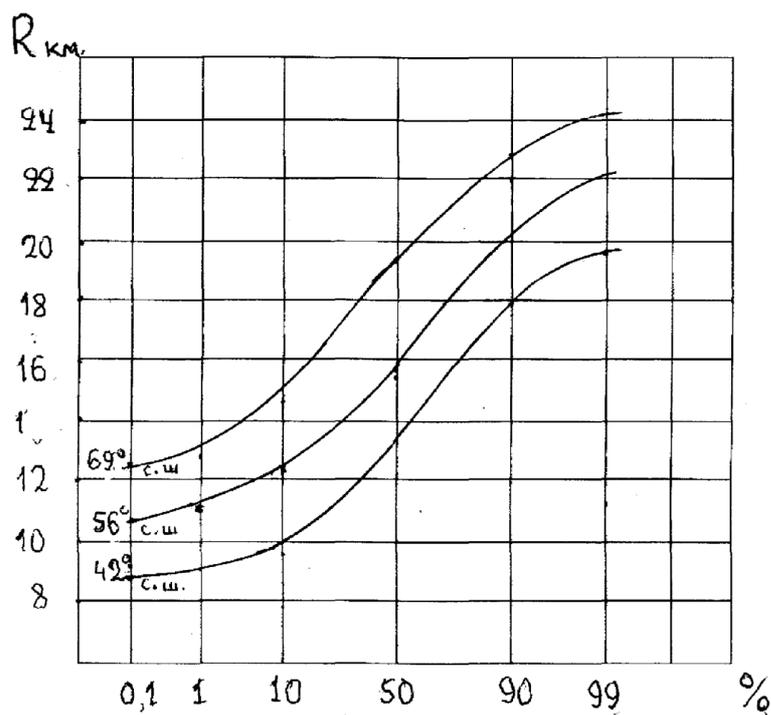


Рис.6 Дальности действия РЛС на волне 3,2 мм для трех широт и дальностей РЛС, равных и меньших значений ординаты.

На Рис.6 показаны зависимости дальности  $R$  обнаружения цели для волны 3,2 мм на разных широтах от процента времени, в течение которого величина  $R$  была равна или меньше величины летом (или равна или больше зимой), указанной ординатой. Анализ кривых распределения дальностей обнаружения цели, проведенный по уровням, соответствующим 0,1% и 91 % времени, показал, что на всех широтах из-за возрастания и убывания коэффициента поглощения в парах воды также имеет место уменьшение и повышения дальности обнаружения. Отметим, что ослабление в парах воды и кислороде на волне 8,2 мм значительно меньше, чем на волне 3,2 мм. Вследствие этого на рис. 6 для широт 42° с.ш., 56° с.ш. и 69° с.ш. имеет место уменьшение летом или увеличение зимой дальности обнаружения целей на 60-80 % относительно среднегодовых значений в 13,5 км, 16,0 км 19,5 км

### Заключение

Таким образом, на основании статистики данных об абсолютной влажности для различных климатических районов и моделирования влияния изменчивости коэффициентов поглощения в парах воды на дальность действия ММ РЛС можно сделать следующее заключение:

- Распределения во времени абсолютной влажности воздуха и коэффициентов поглощения в парах воды позволяет оценивать изменчивость дальности обнаружения целей РЛС в окнах прозрачности ММВ в зависимости от широты места.
- По годовому распределению коэффициентов поглощения установлено, что величины коэффициента поглощения в парах воды на волнах 8,2 и 3,2 мм, соответствующие 0,1% уровню по сравнению с 91% уровнем кривых

распределения по времени, изменялись в зависимости от широты места 42° с.ш. - 69° с.ш. в интервале от 1,8 до 2,7 раз.

- Показано, что изменения коэффициентов поглощения на волнах 3,2 и 1,42 мм, для уровней, соответствующих 0,1% и 91 % времени, приводят к уменьшению или увеличению дальности действия РЛС на 60-80% от среднегодового значения, на волнах же 8,2 и 6 мм оно составляло около 23%.

- Сезонные распределения дальностей действия миллиметровых РЛС на различных широтах не были дополнительно изучены из-за отсутствия таких данных, хотя были по годовой статистике определены предельные изменения, как при увеличении, так и при уменьшении дальностей действия РЛС в зависимостей от широты места.

### Литература

1. A.K.Sen, R.Bera, P.K.Karmakar, S.K.Chatterjee, N.C.Majumdar Millimeter secure communication link and Radar around the oxygen absorption line and application // Indian J. Phys. 75B (3), 241-243 (2001)
2. M.I.Scolnic Millimeter and submillimeter wave application// Proc.of symp.on submillimeter waves. NY, 1970, pp 9-26.
3. Р.П.Быстров, А.А.Потапов, А.В.Соколов, Л.В.Федорова, Р.Н.Чеканов Проблемы распространения и применения миллиметровых радиоволн в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроники, успехи современной электроники, 1997, № 1, с.4-20.
4. А.В.Соколов. Докторская диссертация «Вопросы распространения субмиллиметровых, инфракрасных и оптических волн в атмосфере», 1971, Москва.
5. К.А.Аганбекян, Кандидатская диссертация, 1970, М.
6. Е.В.Сухонин, Кандидатская диссертация, 1970, М.
7. А.Ю.Зражевский «Радиотехника и электроника», 1976, 21, 953.