

## **Сравнение ослабления электромагнитных волн миллиметрового и инфракрасного диапазонов в гидрометеорах и пыли**

**Буй Чи Тхань\*, Марин Д.В.\*\*, Расторгуев В.В.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [buichithanh81@gmail.com](mailto:buichithanh81@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [dmitrym46@yahoo.com](mailto:dmitrym46@yahoo.com)*

*\*\*\*e-mail: [v.rastorguev@mail.ru](mailto:v.rastorguev@mail.ru)*

### **Аннотация**

В статье рассмотрены характеристики ослабления электромагнитных волн (ЭМВ) миллиметрового и инфракрасного (ИК) диапазонов в гидрометеорах и пыли применительно к системам безопасности полёта лёгких самолётов, вертолётов и БЛА. Показаны преимущества использования радиолокационных датчиков миллиметрового (ММ) диапазона по сравнению с тепловизорами инфракрасного (ИК) диапазона при движении летательных аппаратов (ЛА) в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

**Ключевые слова:** безопасность движения, летательные аппараты, гидрометеоры, пыль, ослабление ЭМВ, радио и инфракрасный диапазоны, система радиовидения (СРВ).

### **1. Введение**

Радиолокатор (РЛС) малой дальности миллиметрового (ММ) диапазона, созданный группой специалистов кафедры радиоприёмных устройств Московского авиационного института (национального исследовательского университета), позволяет формировать высокодетальное радиолокационное изображение (РЛИ) местности (например, участка взлётно-посадочной полосы, рулёжной дорожки) и, тем самым, обеспечивать безопасность взлёта и посадки летательного аппарата (ЛА). Ключевыми особенностями этого РЛИ, отличающими его от конкурентных решений, являются высокое разрешение по дальности и азимуту и высокий темп сканирования (обновления данных). Именно за счёт панорамности РЛИ и высоких характеристик пространственного разрешения данный класс РЛС относится к так называемым системам радиовидения (СРВ). Следует отметить, что первоначальный вариант созданной РЛС был адаптирован к наземным транспортным средствам [1].

Учитывая, что технология формирования и обработки РЛИ в созданной РЛС малой дальности в значительной степени завершена, в настоящее время проводятся исследования по возможным альтернативным применениям такой РЛС.

Например, в [2] рассматривается возможность использования данной РЛС в качестве микроволнового датчика контроля эффективной/безопасной дистанции до очага пожара (стены здания) для вертолётной системы пожаротушения высотных зданий. Очевидно, что весь комплекс задач по обеспечению работы вертолётной системы пожаротушения высотных зданий должен решаться в любое время суток, в условиях сильной задымлённости, в том числе при неблагоприятных погодных условиях – в дожде, дымке, снегу (при допустимых условиях эксплуатации

воздушного судна). Оценивая требования (прежде всего при отсутствии визуального контроля окружающего вертолёт пространства в дыму и осадках), в статье был сделан вывод о невозможности их реализации только с использованием систем оптического или ИК диапазона электромагнитных волн (ЭМВ). Безусловно, локализация (определение координат) очага пожара потребует включения в состав комплекса тепловизионных датчиков ИК диапазона. Однако контроль дистанции до очага пожара и стен зданий в таких условиях возможен только с помощью РЛС малой дальности ММ диапазона длин волн с высоким пространственным разрешением.

Современные малые (или лёгкие) ЛА в зависимости от экстренности поставленных задач должны осуществлять маршрутный полет, взлёт и посадку в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости. Поэтому для обеспечения безопасности полёта таких ЛА, также требуется установка на борту панорамной РЛС переднего обзора ММ диапазона.

Несмотря на известные ограничения, в последнее время большое распространение в качестве датчиков систем технического зрения (СТЗ) ЛА и других транспортных средств получили тепловизоры, работающие в ИК диапазоне ЭМВ.

Поэтому целью данной работы является сравнение характеристик ослабления ЭМВ в ММ и ИК диапазонах длин волн при их распространении в атмосфере, содержащей гидрометеоры, песок и пыль. Тем самым, можно будет дать оценку возможности применения на борту ЛА и других транспортных средств

радиолокационных и тепловизионных датчиков при работе в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

## **2. Оценка влияния ослабления ЭМВ ММ диапазона в гидрометеорах и пыли**

Известно [1], что РЛС по целому ряду причин работают в ММ диапазоне радиоволн. При этом международные стандарты, например, для автомобильных радиолокаторов определяют два основных частотных диапазона: 24 ГГц и 77 – 79 ГГц [2].

Известно также [5], что в ММ диапазоне ослабление электромагнитной энергии в атмосфере начинает заметно увеличиваться с ростом частоты зондирующего сигнала. Это обстоятельство вызвано двумя явлениями: поглощением и рассеянием ЭМВ на капельных образованиях или гидрометеорах (главным образом в дожде, тумане; меньше влияют град, снег), а также на твердых частицах (пыль, дым и т. д.). Поглощение вызывается тепловыми потерями в частицах воды или пыли, а потери от рассеяния обусловлены перераспределением энергии в пространстве, при этом, с увеличением частоты рассеивающий эффект увеличивается.

### **Ослабление ЭМВ ММ диапазона в пыли.**

Выражение для коэффициента ослабления (затухания) ЭМВ ММ диапазона может быть записано в виде [3]:

$$k = \frac{2.317 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon''}{[(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2]} \cdot \frac{M}{\lambda C} \quad [\text{дБ/км}] \quad (1)$$

где  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  - действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости частиц пыли,  $\lambda$  - длина волны в метрах,  $M$  - концентрация частиц пыли в воздухе ( $\text{г}/\text{м}^3$ ),  $C = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{км}$  [4]. Значения для  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  взяты из [3],[4] и приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Частота	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$
24 ГГц	5.1	1.4
39 ГГц	4	1.33
77 ГГц	3.5	1.64
79 ГГц	3.5	1.64

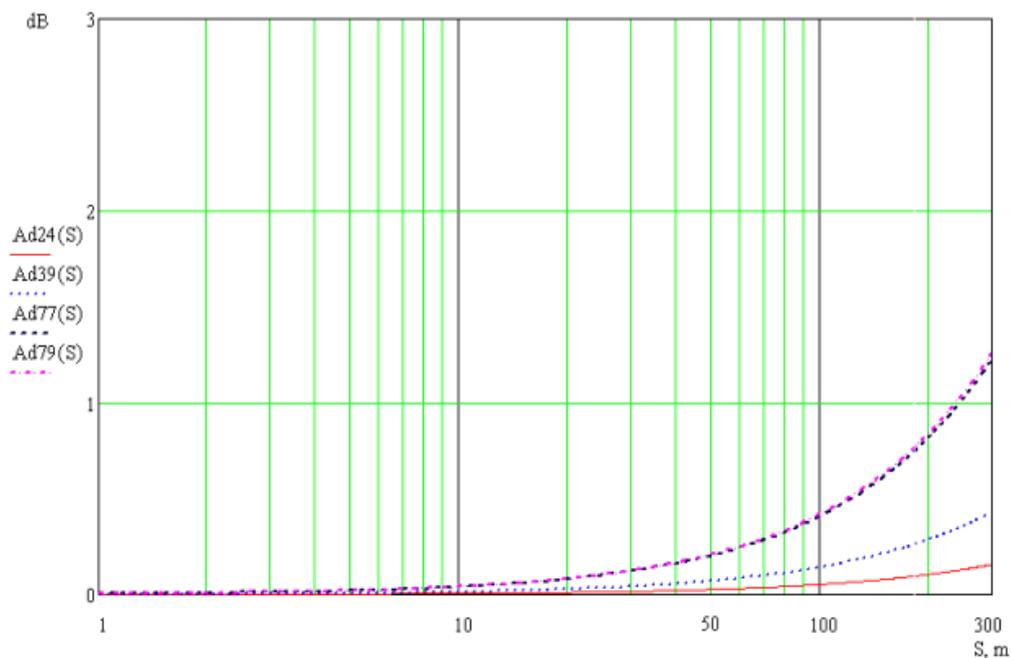
Зависимость ослабления ЭМВ –  $A_d$  (дБ) в пыли от дальности  $S$  (м) можно представить следующим простым соотношением:

$$A_d = k \cdot S \text{ [дБ]} \quad (2)$$

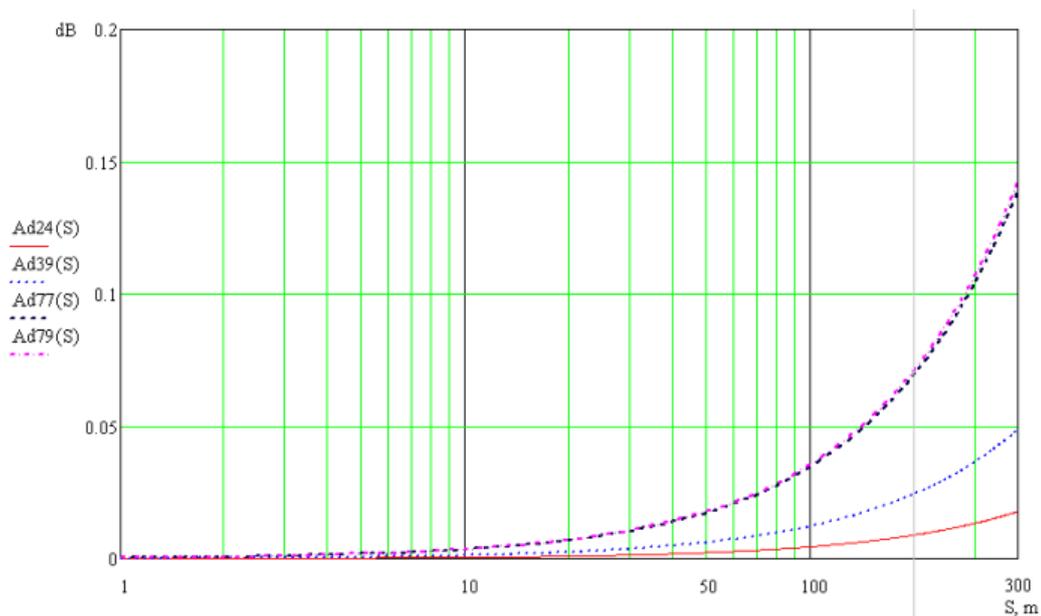
где  $k$  – коэффициент ослабления из выражения (1).

На рисунке 1 представлены графики зависимости  $A_d$  (дБ) от  $S$  (м) для частот 24, 39, 77 и 79 ГГц, при различных значениях концентрации пыли  $M$ , которая соответствует различным значениям оптической видимости.

Концентрация пыли  $M = 3.7 \cdot 10^{-1} \text{ г}/\text{м}^{-3}$  соответствует оптической видимости около 10 м, согласно [4], то есть оптические сенсоры в таких условиях не работают. При этом, анализ графиков (рисунок 1) показывает, что в случае высокой концентрации пыли затухание ЭМВ в ММ диапазоне длин составляет не более 1 дБ. Тем самым подтверждается тот факт, что работа АРЛС не зависит от наличия пыли, песка в зоне работы радара.



$$M = 3.7 \cdot 10^{-1} \text{ г/м}^{-3}$$



$$M = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^{-3}$$

Рисунок 1. Зависимость величины ослабления ЭМВ в пыли от дальности

### Ослабление ЭМВ ММ диапазона в гидрометеорах.

Рассмотрим влияние на распространение ЭМВ гидрометеоров, содержащихся в атмосфере на трассе, с учётом движения впереди идущего автомобиля. Известные результаты исследований показали, что наибольший вклад в ослабление радиоволн ММ диапазона вносят осадки, в особенности дожди.

#### Ослабление ЭМВ в дожде.

Как уже отмечалось выше, энергия ЭМВ одновременно поглощается и рассеивается дождевыми каплями. При этом, ослабление нарастает при увеличении размеров дождевого очага на трассе распространения, а также при увеличении плотности дождя (увеличение числа и размеров дождевых капель). В связи с тем, что для каждого конкретного случая вид распределения частиц по размерам может существенно отличаться, а подбор параметров представляет собой довольно сложную задачу, наиболее распространённым методом нахождения ослабления в дожде является эмпирический метод, в котором считается, что коэффициент ослабления  $\gamma$  зависит от интенсивности осадков  $R$ , следующим образом:

$$\gamma = kR^\alpha \text{ [дБ/км]}, \quad (3)$$

где параметры  $k$  и  $\alpha$  зависят от частоты.

Экспертные данные для значений  $k$  и  $\alpha$  приводятся в рекомендациях [5] для частот от 1 до 400 ГГц. На рисунке 2 представлены графики зависимости коэффициента ослабления  $\gamma$  для ЭМВ с горизонтальной поляризацией от интенсивности дождя, которая может варьироваться от 0,25 мм/ч (морозящий дождь) до 100 мм/ч (сильнейший ливень), для частот 20, 25, 35, 40, 70 и 80 ГГц.

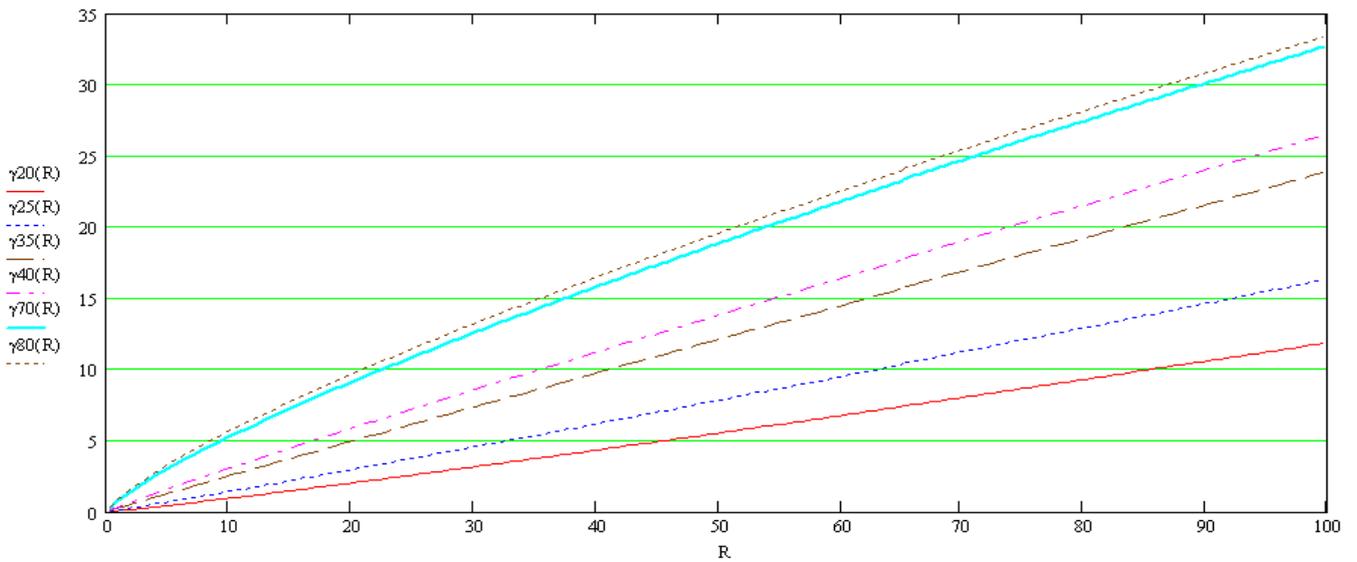
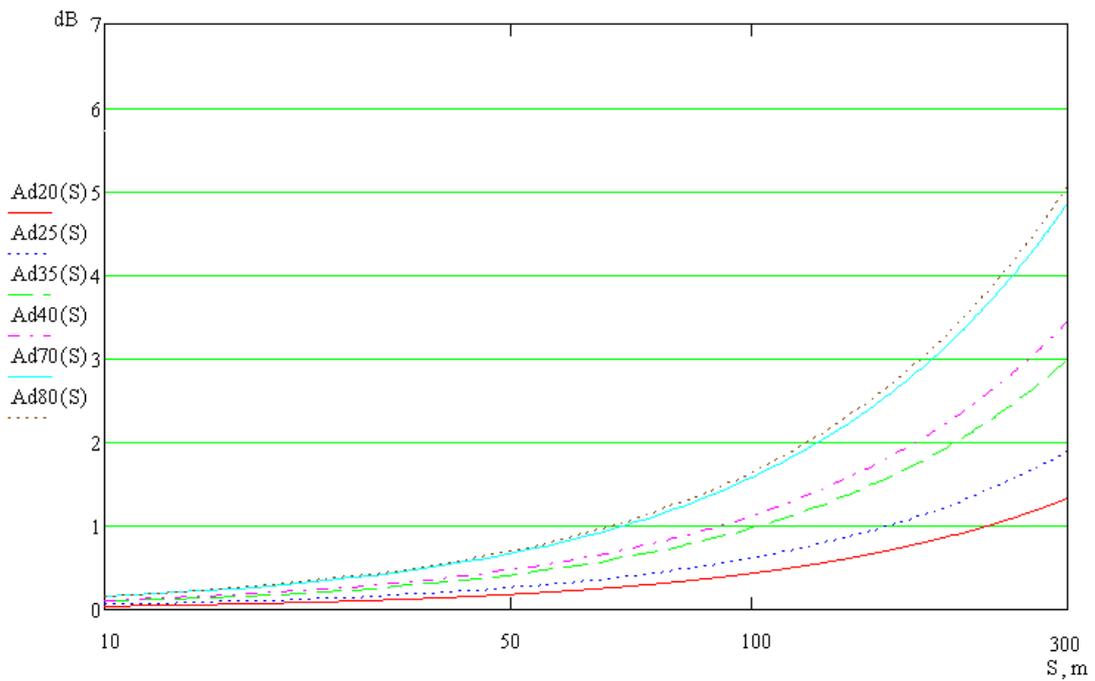
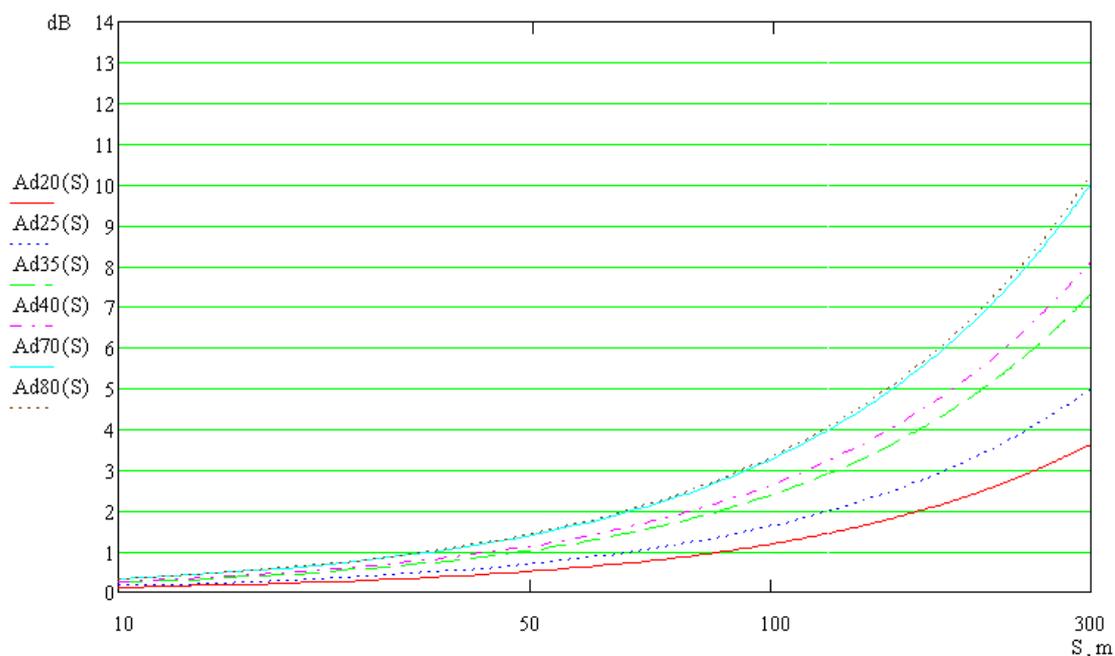


Рисунок 2. Зависимость коэффициента ослабления ЭМВ от интенсивности дождя

На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента ослабления  $A_d$  (дБ) для ЭМВ с горизонтальной поляризацией от дальности  $S$  (м) для частот 20, 25, 35, 40, 70 и 80 ГГц при двух значениях интенсивности дождя: 40 и 100 мм/час.



40 мм/час



100 мм/час

Рисунок 3. Зависимость коэффициента ослабления ЭМВ от дальности

Анализ графиков (рис.3) показывает существенный рост (более, чем в 2 раза) ослабления ЭМВ с увеличением интенсивности дождя. Так, на дальности 300 м это затухание при частоте 80 ГГц составит почти 10 дБ. Тем не менее, на рабочих дальностях работы АРЛС 100 – 150 м это затухание не является столь критическим и составляет порядка 1 – 1,5 дБ.

#### Ослабление ЭМВ в тумане.

Туман из водяных капель наблюдается главным образом при температурах воздуха выше  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но может встречаться даже и при температурах ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  преобладает ледяной туман. Видимость в тумане зависит от размеров частиц, образующих туман, и от его водности (количества сконденсированной воды в единице объёма.). Радиус капель колеблется от 1 до 60

мкм. Большинство капель имеет радиус 5 - 15 мкм при положительной температуре воздуха и 2 - 5 мкм при отрицательной температуре. Водность обычно не превышает 0,05 - 0,1 г/м<sup>3</sup>, но в отдельных плотных туманах может достигать 1 - 1,5 г/м<sup>3</sup>.

Согласно [6], ослабление ЭМВ в тумане можно выразить следующим образом:

$$A = K_l M, \text{ дБ/км} \quad (4)$$

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta)} \text{ дБ/км} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (6)$$

где:  $K_l$  – коэффициент ослабления,  $M$  – водность тумана (г/м<sup>3</sup>),  $f$  – частота (ГГц);  
 $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – это действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости воды.

Ниже на рисунках 4 и 5 приведены графики величины ослабления ЭМВ  $A$  (дБ/км) для частот 24, 39, 77 и 79 ГГц в зависимости от водности тумана  $M$  (г/м<sup>3</sup>) для различных температур.

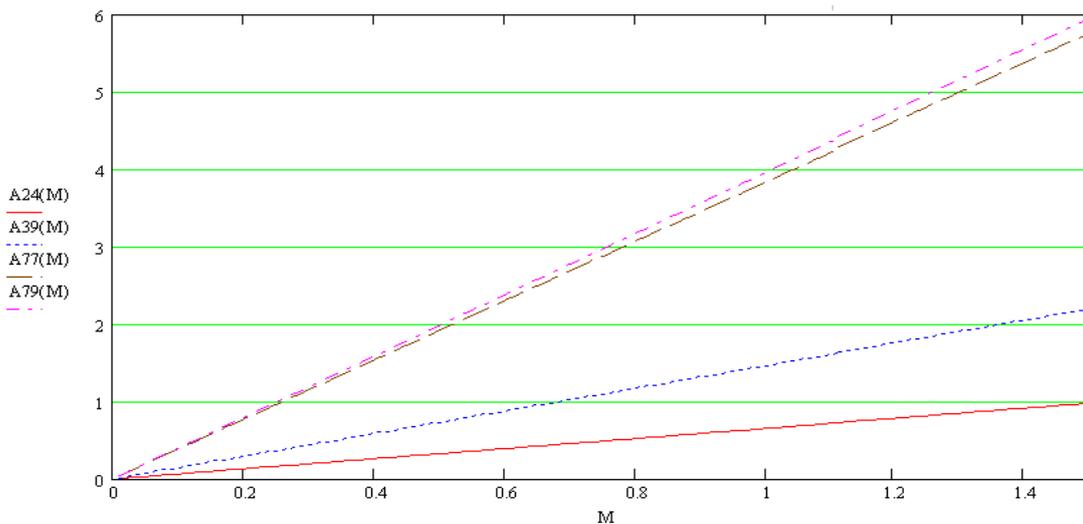


Рисунок 4.  $t = - 10^\circ \text{C}$

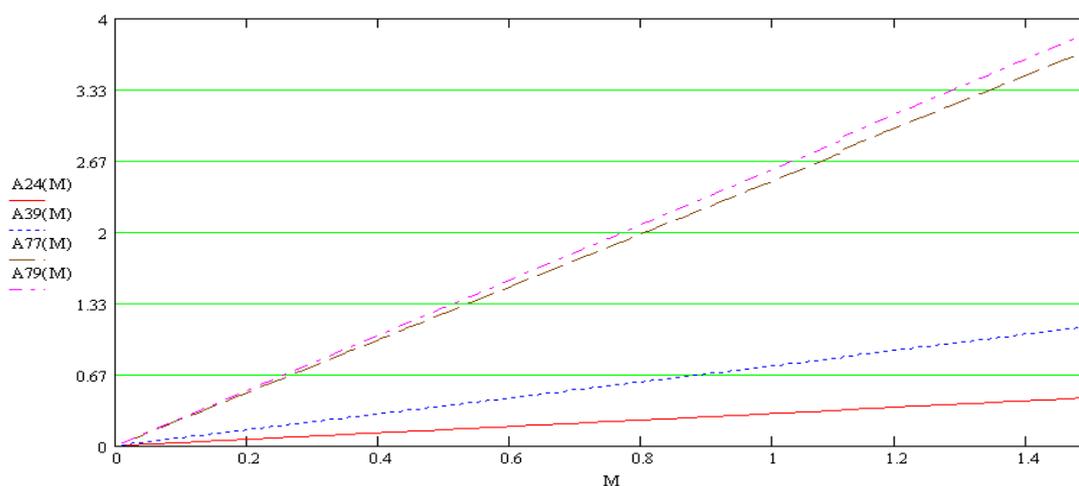


Рисунок 5.  $t = 20^{\circ} \text{C}$

Результаты проведённых расчётов затухания ЭМВ ММ диапазона в зависимости от влажности тумана и температуры окружающей среды показали, что влияние тумана в рассматриваемом ММ диапазоне на затухание ЭМВ даже при высокой влажности тумана невелико (при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , влажности  $1.5 \text{ г/м}^3$  на частоте 79 ГГц на расстоянии 200 м ослабление равно 1.04 дБ).

### 3. Оценка влияния ослабления ЭМВ ИК диапазона в гидрометеорах

Современные тепловизоры работают в ИК на длинах волн 1 – 15 мкм. Эти датчики могут обнаруживать объекты, имеющие температурные контрасты до десятых долей и даже сотых долей градусов, вне зависимости от времени суток, что позволило найти им широкое применение в охранных системах, на транспорте, в промышленности, медицине. Однако, при этом тепловизоры обладают большим недостатком – в сложных погодных условиях (при наличии гидрометеоров или сильной запыленности атмосферы) дальность действия и контрастность формируемого изображения серьезно ухудшаются. Это происходит потому, что проходя в атмосфере, ЭМВ ИК диапазона ослабляются в результате рассеяния и

поглощения. И если азот и кислород, содержащиеся в воздухе, не поглощают ИК излучения и ослабляют его лишь в результате рассеяния, которое невелико, то  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$  и другие вещества, имеющиеся в атмосфере, селективно его поглощают. Особенно сильно поглощают волны ИК диапазона пары воды (полосы поглощения  $H_2O$  расположены почти во всей ИК области спектра), а в средней ИК области —  $CO_2$ . Наличие в атмосфере взвешенных частиц дыма, пыли, мелких капель воды (дымка, туман) — приводит к дополнительному ослаблению ИК излучения в результате рассеяния его на этих частицах.

#### Затухание ЭМВ ИК диапазона в гидрометеорах.

В [7] приведено соотношение для расчета ослабления ИК излучения в дожде:

$$\gamma = kR^a \text{ [дБ/км]} \quad (7)$$

где:  $k$  и  $a$  - коэффициенты, зависящие от частоты,  $R$  – интенсивность дождя (мм/ч).

На рисунке 6 приведен график зависимости затухания ЭМВ ИК диапазона от интенсивности дождя.

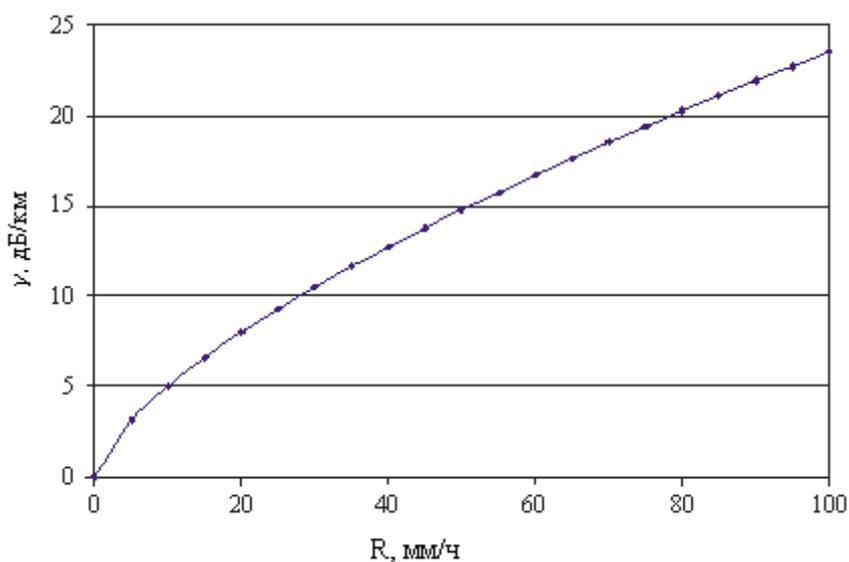


Рисунок 6. Зависимость затухания ЭМВ ИК диапазона от интенсивности дождя

Данные экспериментальные результаты показывают существенный рост затухания ЭМВ ИК диапазона. При этом, сильный дождь  $R = 80$  мм/час приводит к очень большому затуханию – более 20 дБ.

### Затухание ЭМВ ИК диапазона в снеге.

Для расчета затухания волны при наличии снегопада, воспользуемся из [7] выражением (8):

$$\gamma = aS^b \text{ [дБ/км]} \quad (8)$$

где:  $a$  и  $b$  – функции, зависящие от длины волны  $\lambda$  (нм), значения для которых приведены в таблице 2;  $S$  – интенсивность снегопада (мм/ч).

Таблица 2.

	$a$	$b$
Мокрый снег	$0.0001023 \cdot \lambda_{\text{нм}} + 3.7855466$	0.72
Сухой снег	$0.0000542 \cdot \lambda_{\text{нм}} + 5.4958776$	1.38

Зависимости затухания ЭМВ ИК диапазона от интенсивности снегопада для длин волн 3, 5 и 12 мкм представлены на рисунках 7 и 8:

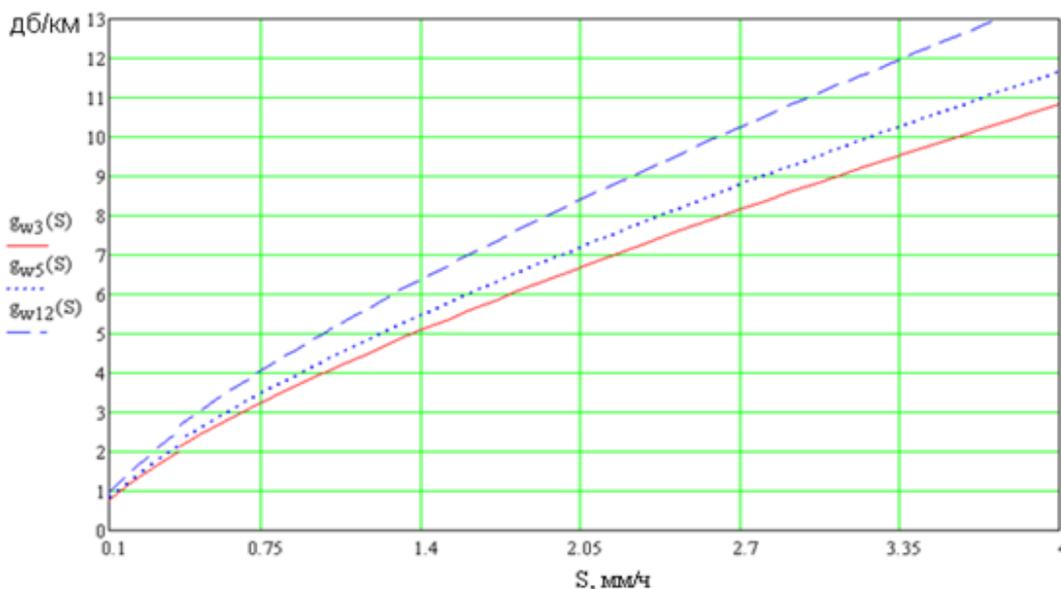


Рисунок 7. Затухание ЭМВ ИК диапазона от интенсивности снегопада (мокрый снег)

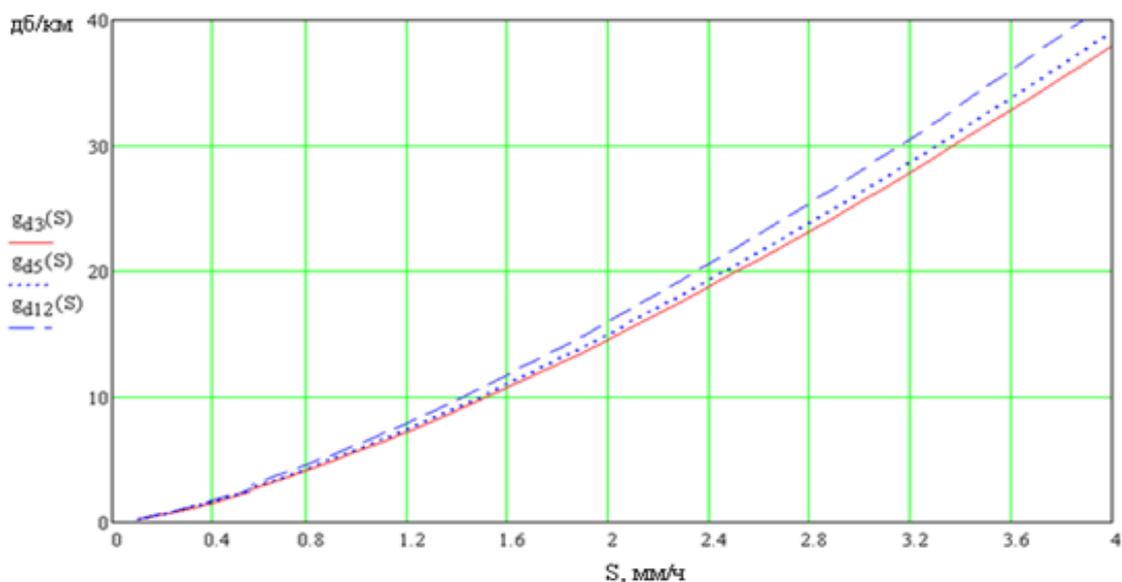


Рисунок 8. Затухание ЭМВ ИК диапазона от интенсивности снегопада (сухой снег)

Анализ графиков (рис. 7,8) показывает существенный рост затухания ЭМВ ИК диапазона при снегопаде. Так, при средней интенсивности снегопада ( $S = 2$  мм/час) величина этого затухания составляет более 10 дБ/км.

#### Затухание ЭМВ ИК диапазона в тумане.

Туман является видимой совокупностью мельчайших капель воды, взвешенных в атмосфере на или вблизи поверхности Земли. Когда воздух почти насыщен парами воды, это означает, что относительная влажность близка к 100%, и что туман может образовываться в присутствии достаточного количества ядер конденсации, которые могут быть частицами пыли или дыма. Поэтому туман может серьёзно ограничить дальность тепловизионной системы вследствие рассеяния света от капель воды. Очевидно, что, чем выше плотность капель, тем больше ИК сигнал уменьшается.

Существуют различные виды тумана. При этом на практике часто применяется классификация, которая используется Международной организацией гражданской авиации (ИКАО). Согласно этой методике, туман могут быть классифицированы в 4 категории:

Категория I: дальность видимости 1220 метров,

Категория II: дальность видимости 610 метров,

Категория IIIa: дальность видимости 305 метров,

Категория IIIб: дальность видимости 92 метров.

В таблице 3 приведены оценки дальности обнаружения (в км) в тумане невооружённым глазом и с помощью ИК камеры в диапазонах 3.0-5  $\mu\text{m}$  и 8-12  $\mu\text{m}$ :

Таблица 3

	дальность видимости	3.0-5 $\mu\text{m}$	8-12 $\mu\text{m}$
Категория	[км]		
I	1.22	3.0-9.8	5.9-10.1
II	0.61	0.54	2.4
IIIa	0.305	0.294	0.293
IIIб	0.092	0.089	0.087

Из таблицы 3 следует, что в категории IIIa и IIIб типов тумана, нет различия при оптической видимости и с помощью ИК камеры теплового излучения. Излучение не проникает сквозь такой густой туман во всех спектральных диапазонах.

На рисунке 9 [8] показаны нормализованные значения интенсивности для линий связи дальнего и среднего ИК излучения, и видимость для этих линий в течение минуты.

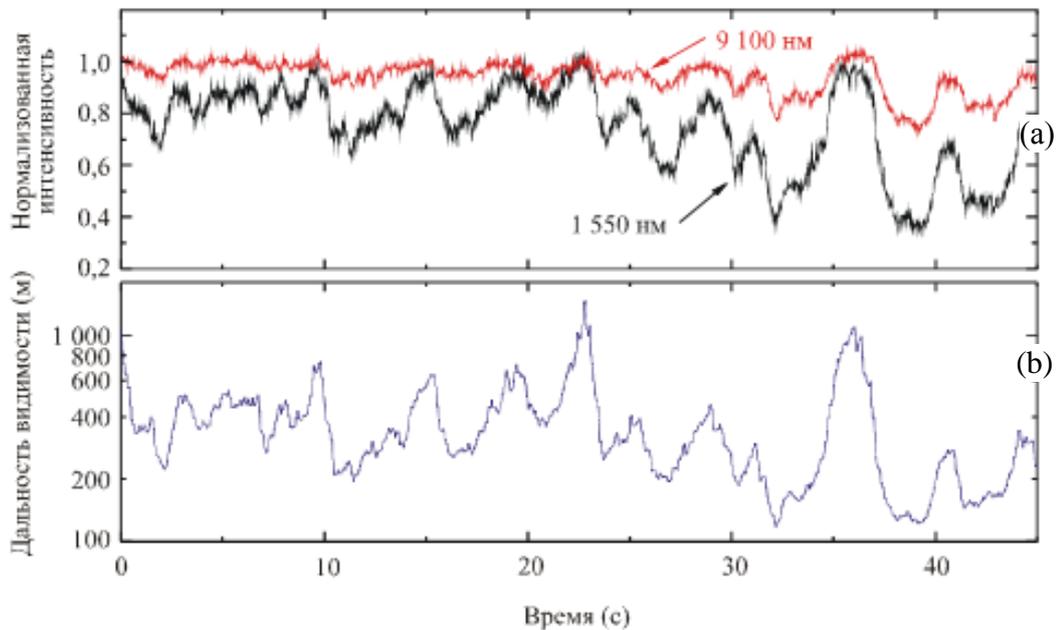


Рисунок 9. Оценки в реальном времени значений интенсивности для линий связи дальнего и среднего ИК излучения (а), и дальность оптической видимости (б), одновременно записанные в течение минуты.

Рассмотрим влияние тумана на ИК излучение на примере ЭМВ при  $\lambda = 1.55$  мкм. На основании экспериментальных данных в [8] получено выражение для коэффициента затухания  $A$  ( $\text{км}^{-1}$ ) на длинах волн близких к 1.55 мкм:

$$A = 289.51 \cdot W^{0.4876} \text{ [дБ/км]} \quad (9)$$

Зависимость ослабления ЭМВ –  $A_d$  (дБ) в тумане от дальности  $S$  (м) можно выразить так:

$$A_d = A \cdot S \text{ [дБ]} \quad (10)$$

Используя выражения (10) на рисунке 10 приведены графики зависимостей коэффициента затухания  $A_d$  от дальности  $S$  (м) для различных значений влажности воздуха.

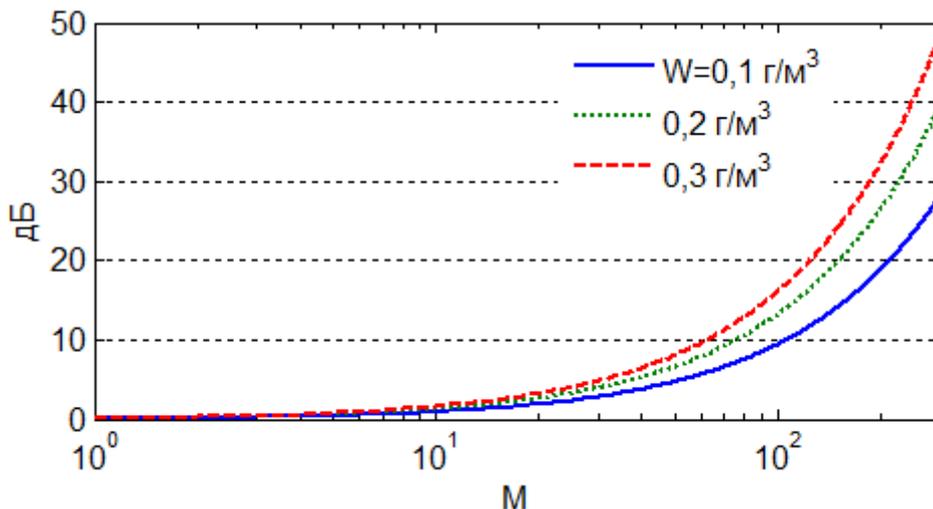


Рисунок 10.

Результаты вычислений, приведённые на графиках (рис. 10), подтверждают факт высокого затухания ЭМВ ИК диапазона в тумане. Так, при дальности 100 м в зависимости от плотности тумана это затухание лежит в пределах 10 – 20 дБ, что не приемлемо для СТЗ транспортных средств.

#### 4. Заключение

Проведённый анализ показал, что при использовании на ЛА систем радиовидения ММ диапазона волн (76 – 77 ГГц или 79 ГГц) необходимо учитывать затухание ЭМВ только в сложных гидрометеорах (сильный дождь). Так в сильном дожде ( $R = 60$  мм/ч) на дальности 200м ослабление ЭМВ составит 4.505 дБ в диапазоне 76 – 79 ГГц. При этом затухание ЭМВ ММ диапазона в пыли даже при ее

высокой концентрации (например, при малой оптической видимости - 10 м) на дальности 200м составит всего 0.85 dB в диапазоне 76 – 79 ГГц.

Сравнивая эти результаты, с результатами, полученными для ЭМВ ИК диапазона при распространении их в атмосфере в присутствии гидрометеоров, можно сделать вывод, что ИК излучение затухает значительно сильнее.

Сравнение ММ и ИК и диапазонов приводит к выводу, что по величине затухания излучения в дожде (при относительно слабом дожде с интенсивностью около 1 мм/час) эти диапазоны сопоставимы и сохраняют работоспособность, на трассе длиной около 1 км (распространение в одном направлении). Однако, в случае сильного дождя ( $R = 80$  мм/час) ИК диапазон становится неработоспособным, поскольку приводит к очень большому затуханию – более 20 дБ.

Влияние снегопада на затухание в ИК диапазоне достаточно велико. Так, при достаточно высокой интенсивности снегопада (3мм/час) на трассе в 200 м ослабление излучения будет составлять порядка 5 дБ.

Известные данные по затуханию ЭМВ в дымке и пыли недостаточны. По мнению зарубежных специалистов [9] именно в этих условиях (наряду с туманом) волны ММ диапазона обладают преимуществом по сравнению с ИК диапазоном. Так, по приблизительным оценкам затухание ИК диапазона в дымке даже при высокой оптической видимости около 1.5 - 2 км составляет 3 - 4 дБ/км для длины волны  $\lambda = 10,6$  мкм и порядка 10 дБ/км для  $\lambda = 1$  мкм.

## Библиографический список

1. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Шевцов В.А. Особенности радиолокационных образов в системах радиовидения ММ-диапазона // Инновации. 2005. №6. С. 98-104.
2. Ананенков А.Е., Карпышев А.В., Морозов Г.А., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Шнайдер В.Б. Микроволновый датчик определения дистанции вертолётной системы пожаротушения // Журнал Известия ВУЗов. Авиационная техника. 2014. №4. С. 57-60.
3. Goldhirsh J.A parameter review and assessment of attenuation and backscatter properties associated with dust storms over desert regions in the frequency range of 1 to 10 GHz, IEEE Trans. Antennas Propagation., vol. AP-30, pp. 1121–1127, November 1982.
4. Patterson E.M., Gillette D.A. Measurements of visibility vs. mass-concentration for air-borne soil particles, Atmospheric Environment, vol. 11, № 2, pp. 193–196, 1977.
5. Elabdin Z., Islam M. R., Khalifa O.O., Raouf H.E.A. Mathematical model for the prediction of microwave signal attenuation due to duststorm, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 6, pp. 139–153, 2009.
6. Ruike Y., Zhensen W., Jinguang Y. The study of MMW and MW attenuation considering multiple scattering effect in sand and dust storms at slant paths, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 24, № 8, August 2003, pp. 1383-1392.
7. Zhao Z., Wu Z. Millimeter-wave attenuation due to fog and clouds. International Journal of infrared and millimeter waves, vol.21, № 10, 2000, pp. 1607-1615.

8. Khan M. S., Grabner M. Empirical relations for optical attenuation prediction from liquid water content of fog. *Radioengineering*, vol.21, № 3, September 2012, pp. 911-916.
9. Chylek P. Extinction and liquid water content of fogs and clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1978, vol. 35, № 2, pp. 296 - 300.