

# Методы и устройства обработки радиолокационной информации

УДК 621.396

## Методика расчета ослабления радиолокационного сигнала в атмосфере

Ермаков С.А.

Рассмотрены причины и методика расчета ослабления радиолокационного сигнала в атмосфере при прохождении до цели и обратно. Основное внимание уделено вопросу влияния на дальность действия радиолокационной станции (РЛС) пыльных и песчаных бурь, который на данный момент остается не до конца изученным. Приведено соотношение для нахождения максимальной дальности действия РЛС при ослаблении радиосигнала в атмосфере. В качестве примера рассмотрен расчет влияния различных внешних факторов на характеристики РЛС Ку-диапазона на трассе длиной 3 км.

*Ключевые слова:* радиосигнал, радиолокационная станция, затухание, атмосфера, пыльная буря, атмосферные явления.

Радиосигнал (радиоимпульс), излучаемый радиолокационной станцией (РЛС), подвергается различным изменениям проходя путь в атмосфере до цели и обратно. Одним из таких важнейших изменений является ослабление радиосигнала при дожде, снеге, тумане, а также пыльных бурях и т.д. Данное затухание радиоволн в атмосфере обусловлено поглощением их энергии свободными молекулами кислорода и водяного пара, а также взвешенными частицами – пылинками и каплями воды. Также происходит рассеяние радиоволн жидкими и твердыми частицами, которые образуют эффект поглощения энергии [1]. Молекулярное рассеяние сигнала подчиняется закону Релея, при котором интенсивность молекулярного рассеяния обратно пропорциональна четвертой степени длины волны.

$$I \sim \frac{1}{\lambda^2}, \quad (1)$$

Чем выше частота и интенсивность осадков, тем больше потери энергии. Самое ощутимое ослабление сигнала происходит на длине волны меньше 3 см. На миллиметровых волнах ослабление сигнала играет важную роль, поэтому используется небольшое “окно” между частотами резонансного поглощения (на волне  $\lambda \approx 8,7$  мм).

На данный момент в радиолокации неизученными остаются пыльные и песчаные бури,

которые также вносят затухание сигнала. Они характеризуются сильным ветром и потоком воздуха, наполненным пылью и песком на достаточно большом расстоянии. Пыльные бури в своем составе несут землю, грязь, песок, а песчаные бури в основном только песок. Частицы от пылевых бурь поднимаются высоко над землей и образуют пылевую завесу, вследствие которой может происходить потеря сигнала, а также нарушение и сбой в работе оборудования [2]. Данное атмосферное явление возникает в таких регионах как Ирак, Сахара, в степной и лесостепной зоне России, юг Казахстана и т.д. Для уменьшения влияния эффектов пыльных бурь производится оценка местности (рельеф, климат) и проводятся мероприятия по снижению скорости ветра, создаются полезащитные лесные полосы, комплексы снего- и водо-задержания, а также используются агротехнические методы. Решением задач по прогнозу пыльных бурь занимаются гидрометеорологические службы в различных странах, таких как Россия, Сербия, Ирак и т.д. [3]. Пример явления пыльной бури представлен на рис. 1.

Обращаясь к рекомендациям Международного союза электросвязи (МСЭ или ИТУ), можно сделать вывод, что тема влияния пыльных бурь на распространение сигнала до сих пор остается не решенной. По имеющимся



Рис. 1. – Надвигающаяся пыльная буря

данным, на частотах ниже 30 ГГц высокая концентрация частиц может оказать влияние на распространение радиоволн [4]. Исходя из этого, целью работы является полная оценка влияния атмосферных явлений на ослабление (затухание) радиосигнала и оценка дальности действия РЛС в условиях воздействия комплекса различных атмосферных явлений. В качестве исследования используются параметры радиолокационной станции такие как: дальность действия – 3,0 км; вид зондирующего сигнала – импульсный с ФКМ; длина волны – 1,8 см.

Известно, что в качестве зондирующих сигналов РЛС часто используются сложные импульсные ЛЧМ и ФКМ сигналы, которые по мере удаления от источника излучения “расплываются” в пространстве, что приводит к ослаблению излучения пучка электромагнитных волн.

Произведем оценку влияния внешних факторов на характеристики РЛС на трассе длиной 3 километра по методике, изложенной в [6].

Затухание, вносимое дождем, находится по выражению:

$$\alpha_d = \Gamma \cdot \nu, \quad (2)$$

где  $\nu$  – интенсивность дождя (слабый дождь) равная 4 мм/ч;  $\Gamma$  – относительное затухание.

Определим относительное затухание при интенсивном дожде:

$$\Gamma = \Gamma/I \cdot \nu, \quad (3)$$

где  $\Gamma/I$  – относительное затухание радиоволн в атмосфере равное 0,007 дБ · км<sup>-1</sup>.

Подставим значения в формулу (3):

$$\Gamma = 0,007 \cdot 4 = 0,028 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1}.$$

Подставим все найденные значения в формулу (2):

$$\alpha_d = 0,028 \cdot 4 = 0,112 \text{ дБ/км}.$$

Определим затухание, вносимое дождем на трассе длиной 3 км:

$$\alpha_{\text{д.3км.дождь}} = 0,112 \cdot 3 = 0,336 \text{ дБ}.$$

Полное затухание при дожде (учитывая трассу до цели и обратно):

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{общ.дождь}} &= \alpha_{\text{д.3км.дождь}} \cdot 2 = \\ &= 0,336 \cdot 2 = 0,672 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

Затухание, вносимое облаками:

$$a = \frac{0,438 \cdot M}{\lambda^2}, \quad (4)$$

где  $M$  – средняя водность кучевых облаков равная 0,6 г/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – длина волны равная 1,8 см.

Подставим среднюю водность облаков и длину волны в формулу (4):

$$a = \frac{0,438 \cdot 0,6}{1,8^2} = 0,08 \text{ дБ/км}.$$

Определим затухание, вносимое облаками на трассе длиной 3 км:

$$\alpha_{\text{д.3км.облака}} = 0,08 \cdot 3 = 0,24 \text{ дБ}.$$

Полное затухание при облаках (учитывая трассу до цели и обратно):

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{общ.облака}} &= \alpha_{\text{д.3км.облака}} \cdot 2 = \\ &= 0,24 \cdot 2 = 0,48 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

Определим затухание, вносимое туманом на трассе длиной 3 километра:

$$a = \frac{0,438 \cdot M}{\lambda^2}, \quad (5)$$

где  $M$  – средняя водность тумана равная 0,45 г/м<sup>3</sup> на высоте равной 90 метров.

Подставим среднюю водность тумана и длину волны в формулу (5):

$$a = \frac{0,438 \cdot 0,45}{1,8^2} = 0,06 \text{ дБ/км.}$$

Определим затухание, вносимое туманом на трассе длиной 3 км:

$$\alpha_{\text{д.3км.туман}} = 0,06 \cdot 3 = 0,18 \text{ дБ.}$$

Полное затухание при тумане (учитывая трассу до цели и обратно):

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{общ.туман}} &= \alpha_{\text{д.3км.туман}} \cdot 2 = \\ &= 0,18 \cdot 2 = 0,36 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Пылевые частицы, возникающие из-за эрозии почвы, сдуваются с земли и взвешиваются в воздухе ветром, вызывая пылевые бури, то есть пылевые туманы и облака, переносимые ветром на значительные расстояния. Ослабление сигнала происходит за счет рассеяния и поглощения энергии взвешенными частицами пыли. Определим затухание, вносимое пылевой бурей на трассе, по методике, изложенной в [5],

$$k = \frac{2,317 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon''}{[(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2] \cdot \lambda} \cdot \frac{M}{C}, \text{ дБ/км,} \quad (6)$$

где  $\varepsilon' = 5,1$  и  $\varepsilon'' = 1,4$  – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости частиц пыли,  $\lambda$  – длина волны в метрах равная 0,018,  $M$  – концентрация частиц пыли в воздухе ( $\text{г/м}^3$ ) равная  $3,7 \cdot 10^{-1}$ ,  $C = 2,3 \cdot 10^{-23} \text{ г} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{км}$ .

Подставим данные значения в уравнение (6):

$$\begin{aligned} k &= \frac{2,317 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4}{[(5,1 + 2)^2 + 1,4^2] \cdot 0,018} \cdot \frac{3,7 \cdot 10^{-1}}{2,3 \cdot 10^{-23}} \\ &= 0,554 \text{ дБ/км.} \end{aligned}$$

Найдем затухание при пыльной буре на трассе длиной 3 км:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{д.3км.пыльная буря}} &= k \cdot 3 = \\ &= 0,554 \cdot 3 = 1,5 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Полное затухание при пыльной буре (учитывая трассу до цели и обратно):

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{общ.пыль}} &= \alpha_{\text{д.3км.пыльная буря}} \cdot 2 = \\ &= 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Общее затухание радиосигнала с учетом дождя, облаков, тумана и пыльной бури при двустороннем распространении составляет  $\alpha_{\text{общее}} = 4,512$  дБ. Так как при атмосферных

осадках уменьшается дальность действия системы, то необходимо заранее, при проектировании системы учитывать ослабление сигнала для обеспечения заданной дальности действия.

Выражение для нахождения максимальной дальности действия РЛС при ослаблении сигнала определяется по методике, изложенной в [7]:

$$D_{\text{макс. погл}} = D_{\text{макс}} \cdot 10^{-0,05 \cdot \alpha_{\text{общее}}}, \quad (8)$$

где  $D_{\text{макс}}$  – дальность действия, которую нужно обеспечить с учетом воздействия атмосферы.

Отсюда получаем соотношение для расчета необходимой дальности РЛС в свободном пространстве:

$$D_{\text{макс}} = D_{\text{макс. погл}} \cdot 10^{0,05 \cdot \alpha_{\text{общее}}}. \quad (9)$$

Подставим исходные данные в уравнение (9):

$$D_{\text{макс. погл}} = 3 \cdot 10^{0,05 \cdot 4,512} = 5,1 \text{ км.}$$

Результатом решения уравнения (9) является требование к дальности действия РЛС в свободном пространстве порядка 5,1 км, что в 1,7 раза больше заданной дальности.

Таким образом, вопрос атмосферных явлений является достаточно серьезным, и особое внимание уделяется вопросу ослабления сигнала при пыльных бурях, который на настоящее время остается не решенным. Для того, чтобы обеспечивать радиолокационный обзор при атмосферных явлениях на заданной дальности увеличивают мощность передатчика. При увеличении мощности увеличивается дальность действия РЛС, тем самым обеспечивается компенсация ослабления сигнала. Другим способом увеличения дальности действия РЛС является увеличение длины волны.

### Литература

1. Общая теория радиолокации и радионавигации. Распространение радиоволн: учебник / А.Н. Фомин, В.А. Копылов, А.А. Филонов, А.В. Андронов; под общ. ред. А.Н. Фомина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 318 с.
2. Насир Самах Аббас Хассан. Разработка и исследование модели каналов линий связи космический аппарат-Земля при пыльных бурях: дис. ... на соиск. учёной степени канд. техн. наук: 2.2.15/ Владимирский государственный университет

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир, 2022. – 169 с.

3. Пыльная буря. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki / Пыльная\\_буря](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пыльная_буря) (дата обращения: 15.11.2022).

4. Рекомендация МСЭ-R P. 618-10 (10/2009). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос. Серия Р. Распространение радиоволн.

5. Буй Ч.Т., Марин Д.В., Расторгуев В.В. Сравнение ослабления электромагнитных волн миллиметрового и инфракрасного диапазонов в гидрометеорах и пыли // Труды МАИ, 2015. – 20 с.

6. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.

7. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

**Поступила 11 ноября 2022 г.**

---

The reasons and methodology for calculating the attenuation of the radar signal in the atmosphere during the passage to the target and back are considered. The main attention is paid to the issue of the influence of dust and sand storms on the range of the radar station (radar), which at the moment remains not fully understood. The ratio for finding the maximum range of the radar when the radio signal is attenuated in the atmosphere is given. As an example, the calculation of the influence of various external factors on the characteristics of the Ku-band radar on a 3 km long highway is considered.

*Key words:* radio signal, radar station, attenuation, atmosphere, dust storm, atmospheric phenomena.

---

*Ермаков Сергей Александрович* - магистрант 2-го курса по направлению подготовки магистратуры 11.04.01 «Радиотехника» факультета информационных технологий и радиоэлектроники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* 89506024047@bk.ru.

*Адрес:* 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.