

УДК 355.7

## ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ РАЙОНА РАЗМЕЩЕНИЯ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Кузнецов Д.Н.

*ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж) (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: [vrnh@bk.ru](mailto:vrnh@bk.ru)*

---

При планировании и проведении любого рода занятий и учений необходимо установить взаимодействие между удаленными объектами, поэтому была рассмотрена задача инженерной подготовки района рассредоточения за счет мобильных и стационарных средств, непрерывной возможности обмена информацией между объектами при ограниченном радиусе непосредственной связи между ними. При этом каждый из объектов может территориально размещаться в любой точке района рассредоточения. Рассмотрены различные факторы, оказывающие влияние на инженерную подготовку района. Проведен анализ сокращения дальности действия радиосредств из-за ослабления энергии радиоволн в атмосфере и кривизны земной поверхности, поглощения радиоволн в кислороде, парах воды и тумане. Рассмотрена вероятность передачи определенного количества сообщений за заданное время с учетом помех, препятствующих декодированию сообщения, а также общая вероятность бесперебойной работы в зависимости от показателей надежности узлов передачи в системе.

---

Ключевые слова: моделирование, обучение, рассредоточенные объекты, передача сообщений, передатчик, приемник.

## OBJECTIVES ENGINEERING TRAINING DEPLOYMENT AREA DISTRIBUTED OBJECTS

Kuznetsov D.N.

*Russian Air Force Military Educational and Scientific Center of the "N. E. Zhukovskiy and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia (394054, Voronezh, street Starih Bolshevikov, 54a), e-mail: [vrnh@bk.ru](mailto:vrnh@bk.ru)*

---

In planning and carrying out of any type of occupation and exercise, it is necessary to establish communication between remote objects, so we considered the problem of engineering training area due to dispersal of mobile and fixed assets, the possibility of a continuous exchange of information between objects with a limited radius of direct communication between them. Wherein each of the objects can be placed in geographically anywhere dispersal region. Various factors affecting the engineering training area. The analysis of reducing the range of the radio due to weakening energy of radio waves in the atmosphere and the earth's curvature, the absorption of radio waves in oxygen, water vapor and mist. We consider the probability of transmission of a certain number of posts within the specified time, taking into account the interference to decode the message, as well as the overall probability of trouble-free operation, depending on the parameters of reliability transmission nodes in the system.

---

Keywords: modeling, training, dispersed objects, messaging, transmitter, receiver.

Технология распределенного интерактивного моделирования концептуально обеспечивает возможность совместного обучения операторов управляемых объектов независимо от их территориального расположения, так как современные средства коммуникаций позволяют обеспечить связь с объектами, расположенными на разных географических участках.

Однако на практике приходится руководствоваться некоторыми ограничениями, которые в основном заключаются в стоимости средств коммуникации, их надежности, радиусе достижимости, живучести и т.п.

Живучесть характеризуется наличием связи между объектами. При этом связь устанавливается не только непосредственно между взаимодействующими объектами, но и через цепь других участников или средств инженерной подготовки.

Современные доступные радиосредства сети Ethernet обеспечивают ограниченный радиус взаимодействия (до 150 км) при условиях прямой видимости, в режиме «точка-точка».

Таким образом, в качестве концепции района рассредоточения объектов, в условиях приведенных ограничений, используется ограниченный (условно плоский) прямоугольный район территории.

Задача инженерной подготовки района размещения рассредоточенных объектов заключается в обеспечении, за счет мобильных и стационарных средств, непрерывной возможности обмена информацией между объектами при ограниченном радиусе непосредственной связи между ними. При этом каждый из объектов может территориально размещаться в любой точке района рассредоточения.

В связи с тем что объекты разнесены на ряд географических участков, на инженерную подготовку района могут оказывать влияние различные факторы, в том числе:

- сокращение дальности действия радиосредств из-за ослабления радиоволн в атмосфере и кривизны земной поверхности;
- высота антенны базовой станции;
- вероятность передачи определенного количества сообщений за заданное время в зависимости от интенсивности обмена;
- общая вероятность бесперебойной работы в зависимости от показателей надежности узлов передачи;
- вероятность времени передачи одного сообщения с учетом помех, препятствующих декодированию сообщения;
- максимальное практически возможное время передачи всех сообщений;
- вероятностно-временные характеристики работы сети, такие как задержки и потери;
- мощность передатчика базовой станции;

Все эти факторы влияют на радиус охвата непосредственной связи между объектами и производительность сети в целом [5].

### **Сокращение дальности действия радиосредств из-за ослабления энергии радиоволн в атмосфере и кривизны земной поверхности**

Влияние на дальность действия радиосредств внешних условий обусловлено поглощением и рассеянием радиоволн в атмосфере, отражением их от Земли, атмосферной

рефракцией, отражением от ионосферы, влиянием подстилающей поверхности вдоль трассы, по которой распространяется радиосигнал.

Степень влияния этих факторов зависит от частотного диапазона и условий эксплуатации радиосистемы (время суток, топология местности, высота антенн передатчика и приемника).

При распространении в атмосфере радиоволны теряют часть энергии, которая поглощается и рассеивается молекулами кислорода и водяного пара, атмосферными осадками, частицами пыли и другими неоднородностями атмосферы [3].

Зависимость поглощения энергии в кислороде и парах воды от длины волны представлены на рисунках 1, 2.

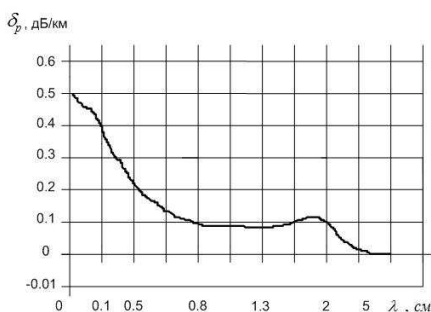


Рис. 1. Поглощение радиоволн в кислороде в зависимости от их длины (см).

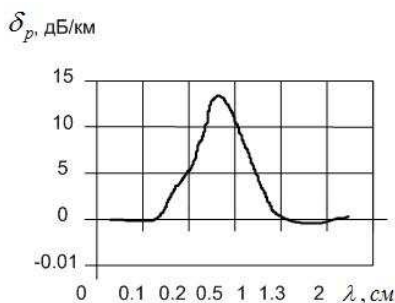


Рис. 2. Поглощение радиоволн в парах воды в зависимости от их длины (см).

Величина  $\delta_p$  называется коэффициентом затухания и характеризует удельное затухание (в децибелах на километр) при распространении радиоволн в одном направлении.

На волнах вблизи 0.5 и 0.25 см для кислорода и около 0.18 и 1.35 см для водяного пара наблюдаются пики резонансного поглощения, характеризующиеся резким возрастанием затухания радиоволн.

Зависимость величины затухания при дожде и тумане представлены на рисунке 3.

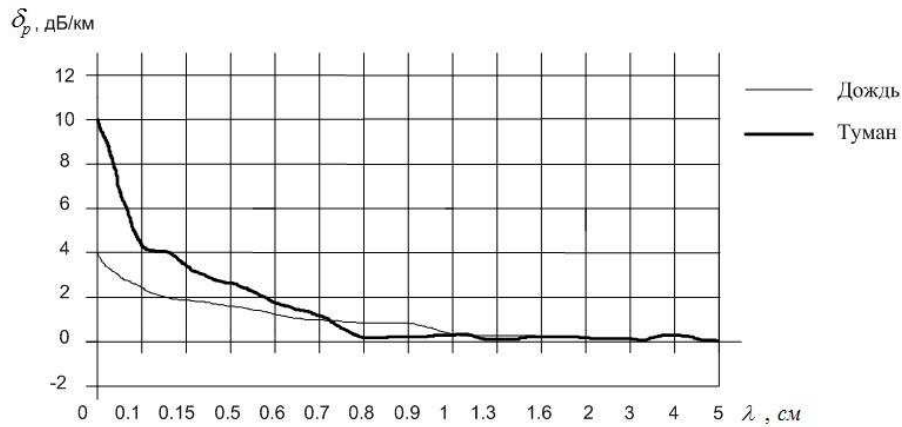


Рис. 3. Поглощение радиоволн при тумане и дожде в зависимости от длины волны (см).

Снег и град при одинаковой с дождем интенсивности значительно меньше влияют на величину ослабления энергии, поэтому их можно не принимать во внимание.

Приведенные графики показывают, что ослабление энергии радиоволн при  $\lambda > 10 - 15$  см весьма незначительно, и, следовательно, обусловленное этим явление уменьшение дальности действия для радиосредств дециметрового и метрового диапазонов в большинстве случаев можно не учитывать.

Дальность действия с учетом ослабления энергии радиоволн на участке протяженностью  $d$  определяется формулой [3]

$$D_{max.p} = D_{max} e^{-0.115\delta_p d},$$

где  $D_{max.p}$  – дальность действия с учетом ослабления энергии;

$D_{max}$  – дальность действия в свободном пространстве (для волн ультракороткого диапазона, при заданных размерах антенн  $D_{max} = \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$ ,  $\lambda$  – длина волны);  $\delta_p$  – определяется по графикам рисунков 1, 2, а величина  $d$  – по статистическим или конкретным данным метеослужбы.

В реальных условиях при определении дальности радиосредств, работающих в дециметровом диапазоне, необходимо учитывать кривизну земной поверхности. Прямолинейность распространения радиоволн дециметрового диапазона и отсутствие отражения от слоев атмосферы приводит к тому, что дальность действия из-за кривизны земной поверхности будет ограничиваться предельным значением  $D_{пред}$ . Таким образом, при расчете действия радиоустройств дециметрового диапазона следует всегда иметь в виду, что для нормальных атмосферных условий  $D_{max} \leq D_{пред}$ . При прямолинейном распространении радиоволн предельная дальность, называемая «дальностью прямой видимости», будет равна

$$D_{пред} = \sqrt{2R} \left( \sqrt{h \left( 1 + \frac{h}{2R} \right)} + \sqrt{H \left( 1 + \frac{H}{2R} \right)} \right),$$

где  $R = 6371$  км – радиус Земли;  $H$  и  $h$  – высоты расположения источника радиосигналов и приемной антенны. Так как  $R \geq H$  и  $R \geq h$ , то для практического применения можно использовать формулу

$$D_{\text{пред}} \approx 113(\sqrt{H} + \sqrt{h}),$$

где  $D_{\text{пред}}$ ,  $h$  и  $H$  – в километрах.

Неоднородность тропосферных слоев атмосферы по высоте приводит к искривлению траектории радиоволн (рефракции в вертикальной плоскости). Величина и характер рефракции зависят от характера изменения коэффициента преломления при увеличении высоты.

Влияние положительной рефракции на дальность радиоканала обычно учитывают, заменяя действительный радиус Земли на эффективный радиус Земли,  $R = 4/3 R = 8495$  км.

При использовании эффективного радиуса Земли считается, что радиоволны распространяются прямолинейно с постоянной скоростью над Землей с большим диаметром. Дальность прямой видимости при использовании радиогоризонта при эффективном радиусе Земли с учетом рефракции определяется с помощью выражения [1]:

$$D_{\text{пред}} \approx \sqrt{2(4/3 R)(\sqrt{h} + \sqrt{H})};$$

$$D_{\text{пред}} \approx 130(\sqrt{h} + \sqrt{H}).$$

Если передатчик, приемник или оба вместе движутся друг относительно друга, то частоты принимаемых сигналов отличаются от частоты сигналов передатчика (эффект Доплера), причем сближение передатчика и приемника приводит к возрастанию, а удаление – к уменьшению первоначальной частоты  $f$  на величину [4]

$$F_{\text{д}} = v_r \frac{f}{v},$$

где  $v_r$  – радиальная составляющая скорости сближения (удаления);  $v$  – скорость распространения радиоволн.

Длина волны и частота пропорциональны друг другу. Длину волны всегда можно вычислить, если разделить скорость распространения этой волны (300000 км/ч) на частоту [3]

$$\lambda = \frac{300000000 \text{ м/с}}{f}.$$

**Вероятность передачи определенного количества сообщений за заданное время**

Постановка задачи. По радиоканалу передается ряд сообщений. Продолжительность одного сообщения  $X$  – случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром  $\lambda$ . Интервал между сообщениями – случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром  $\mu$ . Длины отдельных сообщений в интервале между ними не коррелированы. Найти вероятность того, что за время  $t$  будет передано не менее  $m$  сообщений ( $m > 1$ ).

Решение. Общая продолжительность  $T$   $m$  сообщений плюс перерывы между ними представляет собой случайную величину, распределенную по обобщенному закону Эрланга [2] порядка  $2m-1$  с параметрами

$$\lambda_i, i=\overline{1, m}, \mu_i, i=\overline{1, m-1}.$$

Вероятность того, что за время  $t$  будет передано не менее  $m$  сообщений, есть не что иное, как функция распределения случайной величины  $T$ :

$$P \{ \text{не менее } m \text{ сообщений за время } t \} = P\{T < t\} = G(t).$$

Случайная величина  $T$  представляет собой сумму двух независимых величин:  $T = T_1 + T_2$ , где  $T_1$  – распределена по закону Эрланга  $m$ -го порядка с параметром  $\lambda$ :

$$g_1(t) = \frac{(\lambda t)^{m-2}}{(m-2)!} e^{-\lambda t} (t > 0);$$

$T_2$  – по закону Эрланга  $(m-1)$ -го порядка с параметром  $\mu$ :

$$g_2(t) = \frac{(\mu t)^{m-2}}{(m-2)!} t^{-\mu t} (t > 0)$$

Следовательно, для случая  $\lambda > \mu$

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^t g_1(\tau) g_2(t-\tau) d\tau = \int_0^t \frac{(\lambda \tau)^{m-2}}{(m-2)!} \times \\ &\times \frac{[\mu(t-\tau)]^{m-2}}{(m-2)!} e^{-(t-\tau)} d\tau = \frac{\lambda^{m-2} \mu^{m-2}}{(m-2)! (m-2)!} \times \\ &\times \sum_{i=0}^{m-2} C_{m-2}^i t^{m-2-i} (-1)^i \frac{(m-1+i)!}{(\lambda - \mu^{m+i})} \times \\ &\times \left[ 1 - \sum_{k=0}^{m-1+i} \frac{[(\lambda - \mu)t]^k}{k!} e^{-(\lambda - \mu)t} \right] e^{-\mu t} (t > 0). \end{aligned}$$

(1.1)

Для случая  $\mu > \lambda$

$$g(t) = \int_0^t g_1(t-\tau) g_2(\tau) d\tau = \frac{\lambda^{m-2} \mu^{m-2}}{(m-2)! (m-2)!} \sum_{i=1}^{m-1} C_{m-1}^i t^{m-1-i} (-1)^i \times$$

$$\times \frac{(m+i)!}{(m-\lambda)^{m+1+i}} \left[ 1 - \sum_{k=0}^{m-i+1} \frac{[(\mu-\lambda)t]^k}{k!} e^{-(\mu-\lambda)t} \right] e^{-\lambda t} (t > 0) \quad (1.2)$$

Для случая  $\lambda = \mu$

$$g(t) = \lambda \frac{(\lambda t^{2m-2})}{(2m-2)!} e^{-\lambda t} (t > 0) \quad (1.3)$$

**Общая вероятность бесперебойной работы в зависимости от показателей надежности узлов передачи** в системе, состоящей из  $n$  узлов (связей), имеет вероятность ( $P$ ) безотказной работы, равную

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$$

где  $p_i$  – вероятность безотказной работы одного узла.

Тогда по заданным показателям  $P$  и  $p_i$  при

$p_i = p_j = p(i, j = \overline{1, n})$  можно определить допустимое количество узлов передачи по формуле:

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1-p)}{\ln(p)} \right\rceil, \quad (1.4)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  – обозначение целой части значения.

### **Вероятность времени передачи одного сообщения с учетом помех, препятствующих декодированию сообщения**

Существующие промышленные сети связи оптимизированы не на время передачи сообщения, а только на достоверность передачи. Так как одним из принципов построения технологии распределенного интерактивного моделирования является ограничение на время передачи информации, то необходимо рассмотреть задачу в следующей постановке.

При передаче сообщения по радиоканалу наблюдаются помехи, препятствующие декодированию сообщения; с вероятностью  $p$  сообщение не удастся декодировать. Сообщение передается до тех пор, пока не будет декодировано. Продолжительность передачи сообщения равна  $t$  минут.

Определить: 1) математическое ожидание времени  $T$ , которое уйдет на передачу сообщения; 2) вероятность того, что на передачу сообщения понадобится время большее, чем  $t_0$ .

1. Случайная величина  $X$  – число «попыток» передать сообщение – имеет геометрическое распределение [2], начинающееся с единицы;  $T=tX$  минут. Распределение случайной величины  $T$  будет

$$T: \frac{|t|}{|q|} \frac{|2t|}{|pq|} \frac{3t}{p^2q} \dots \frac{|mt|}{|p^{n-1}q|} \dots,$$

где  $q=1-p$ .

2.

$$P\{T > t_0\} = \sum_{m=[t_0/t]+1}^{\infty} p^{m-1}q = q \sum_{m=[t_0/t]+1}^{\infty} p^{m-1},$$

где  $[t_0/t]$  – наибольшее целое число, содержащееся в  $t_0/t$ . Суммируя геометрическую прогрессию, имеем

$$P\{T > t_0\} = \frac{q}{1-q} p^{[t_0/t]+1} = qp^{[t_0/t]}. \quad (1.5)$$

Задачу нахождения максимального практически возможного времени передачи всех сообщений можно рассмотреть в следующей постановке. По каналу связи передается  $n$  сообщений; длительность каждого сообщения случайная, имеет одно и то же математическое ожидание  $m$  и дисперсию  $\sigma_t^2$  и зависит от длительности других  $n$  сообщений. Найти математическое ожидание и дисперсию суммарного времени  $T$ , за которое будут переданы все  $n$  сообщений. Найти  $T_{max}$  – максимальное практически возможное время передачи всех сообщений.

$$T = \sum_{i=1}^n t_i,$$

где  $t_i$  – длительность передачи  $i$ -го сообщения ( $i=\overline{1..n}$ ).

По теореме сложения математических ожиданий

$$M[T] = M \left[ \sum_{i=1}^n t_i \right] = \sum_{i=1}^n T[t_i] = nm.$$

По теореме сложения дисперсий

$$D[T] = D \left[ \sum_{i=1}^n t_i \right] = \sum_{i=1}^n D[t_i] = n\sigma_t^2.$$

Тогда по «правилу трех сигм» [2]

$$T_{max} = nm + 3\sigma_t\sqrt{n}. \quad (1.6)$$



Таким образом, в соответствии с отмеченными выше общими положениями моделирования после постановки задачи и определения свойств оригинала, подлежащих исследованию, необходимо констатировать, что проведение исследований оригинала в натуре на ранних этапах проектирования невозможно.

Необходимо выбрать модель, которая достаточно хорошо фиксирует существенные свойства оригинала и легко поддается исследованию.

Метод статистического моделирования координат объектов, распределенных по различным законам распределения, вполне адекватно поможет провести исследования в соответствии с поставленной задачей.

Выбор двух законов распределения равномерного и нормального позволяет в принципе полностью исследовать распределение статических и мобильных объектов в районе рассредоточения с целью определения путей инженерной подготовки этого района.

### **Список литературы**

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. - М. : Радио и связь, 1983. - 416 с.
2. Водолазкий З.В. Стандарт шифрования ДЕС // Монитор. - 1992. - № 3-4.
3. Зойтендейк Г. Методы возможных направлений. - М. : Иностранная литература, 1963. - 176 с.
4. Черкесов Г.Н., Рябинин И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. - М. : Радио и связь, 1981. - 295 с.
5. Хассан М. Анализ живучести вычислительных сетей критического использования // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров : материалы Международной научно-технической конференции. - Пенза, 1999. - С. 110-111.

### **Рецензенты:**

Душкин А.В., д.т.н., доцент, начальник кафедры управления и информационно-технического обеспечения ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», г. Воронеж;

Работкина О.Е., д.т.н., доцент, профессор кафедры гражданской защиты ФГБОУ ВПО «Воронежский институт ГПС МЧС России», г. Воронеж.