

УДК 621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_28

**МОДЕЛЬ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ
КАК ОСНОВА ЧАСТОТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ**
RADIO NETWORK MODEL AS A BASIS FOR FREQUENCY PLANNING

Д.И. Коньков

D.I. Kon'kov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Материалы статьи посвящены вопросу создания модели сети радиосвязи, которая позволяет учесть состав объекта исследования, проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, а также условия распространения и учет замираний радиоволн. Показаны постановка задачи, входные и выходные данные модели, а также алгоритм ее создания. Рассмотрен способ представления модели сети радиосвязи в виде набора радиосетей с массивом данных, дающим полное представление о рассматриваемом объекте с точки зрения управления радиочастотным спектром, а также расчета значения вероятности связи, как показателя электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: сеть радиосвязи, электромагнитная совместимость, радиочастотный спектр, частотное планирование, затухание и замирание радиоволн, вероятность связи.

The article is devoted to the issue of creating a radio communication network model that allows taking into account the composition of the object of study, problems of electromagnetic compatibility of radio electronic equipment, as well as the conditions of propagation and accounting for fading of radio waves. The statement of the problem, input and output data of the model, as well as the algorithm for its creation are shown. The method of representing the radio communication network model as a set of radio networks with an array of data that gives a complete idea of the object under consideration from the point of view of radio frequency spectrum management, as well as calculating the value of the probability of communication as an indicator of electromagnetic compatibility is considered.

Keywords: radio communication network, electromagnetic compatibility, radio frequency spectrum, frequency planning, attenuation and fading of radio waves, probability of communication.

Неотъемлемым условием качественного функционирования сети радиосвязи является разработка радиоданных, позволяющих обеспечить требуемый уровень помехоустойчивости. От того, с каким качеством и в какие сроки разрабатываются радиоданные, существенно зависят основные свойства радиосвязи.

Разработка радиоданных представляет собой достаточно сложный организационно-технический процесс, включающий в себя решение целого ряда разнообразных по своему характеру задач и требующий больших трудозатрат должностных лиц органов управления радиосвязью [1–4]. Рост количества применяемых ра-

диосредств и повышение требований к радиосвязи неизбежно вызывают усложнение данного процесса. Кроме того, необходимо учитывать воздействие непреднамеренных помех, которые по-прежнему оказывают значительное влияние на сети радиосвязи, что приводит к снижению помехоустойчивости в сложной электромагнитной обстановке.

Динамика развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) показывает тенденцию построения архитектуры сетей радиосвязи в формате распределенных систем локальных сетей, объединенных опорными сетями, как показано на рис. 1.

При этом существующие методики распределения частот для сетей радиосвязи не обеспечивают требуемого уровня автоматизации как самого процесса, так и качества выходных данных. Это связано в первую очередь с разработкой новых средств и комплексов радиосвязи с новыми режимами работы и расширением используемого диапазона частот. Увеличение объема радиоэлектронных средств на ограниченной местности в совокупности с различными роботехническими комплексами влечет за собой значительный рост уровня непреднамеренных помех и обострение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС).

Все перечисленные особенности приводят к необходимости создания нового аппарата частотного распределения. Для качественного решения данной задачи необходимо создание модели сети радиосвязи. Блок-схема построения данной модели представлена на рис. 2.

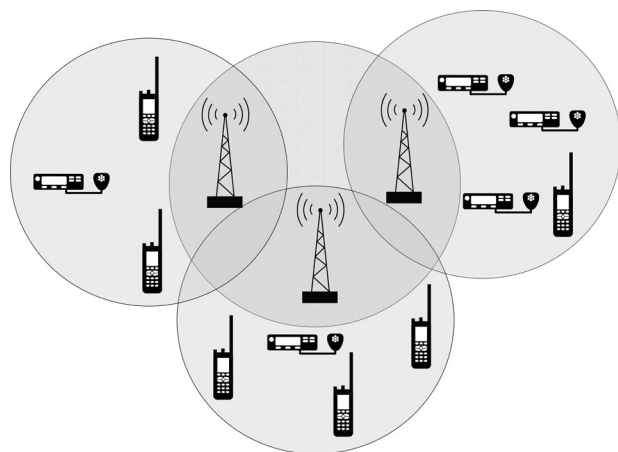


Рис. 1. Пример построения современной сети радиосвязи

Стоит заранее оговориться о том, что данная модель предполагает детерминированное распределение РЭС на карте местности. В связи с этим большое внимание при организации связи должно уделяться вопросу планирования. Оператор должен иметь представление о том, где на местности будут развернуты те или иные радиосети, а также знать какими именно средствами они будут образованы. Для каждого РЭС необходим набор данных, хранящихся в общей информационной базе, включающий в себя следующие сведения о применяемых радиосредствах:

- 1) диапазон рабочих частот РЭС Δf ;
- 2) массив самопораженных частот $f_{сп}$;
- 3) массив частот побочных излучений $f_{пи}$;
- 4) массив частот побочных каналов приема $f_{пк}$;

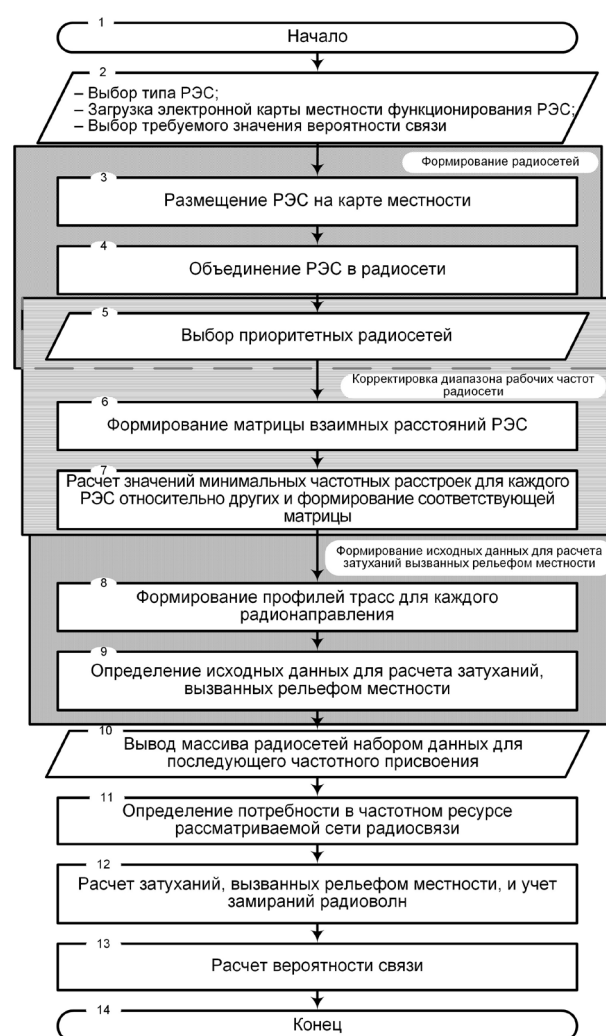


Рис. 2. Блок-схема построения модели сети радиосвязи

- 5) мощность на выходе усилителя P ;
- 6) коэффициент согласования по сопротивлению ξ_0 ;
- 7) коэффициент согласования по поляризации ξ_n ;
- 8) коэффициент полезного действия фидера η_f ;
- 9) коэффициент прямоугольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемника μ ;
- 10) дальность связи r_0 ;
- 11) требуемое значение вероятности связи $P_{\text{св тр}}$.

Также для определения коэффициента усиления G необходимо выбрать тип используемой совместно с РЭС антенны и место ее установки — для определения высоты подвеса. После расстановки радиостанций на электронной карте местности происходит формирование радиосетей, например: «Радиосеть № 27. Сеть ...». В случае необходимости радиосети присваивается приоритет. Расстановка приоритета актуальна только для сетей радиосвязи с режимами работы на фиксированной частоте и заключается в присвоении частот из нижнего диапазона с наибольшим значением вероятности связи, обеспечивающих лучшее распространение [5].

На следующем этапе для заданного размещения РЭС вычисляется матрица взаимных удалений $\|r_{ij}\|$ следующего вида (рис. 3), где, например, $r_{27.1/1.1}$ означает расстояние между первой радиостанцией радиосети 27 и первой радиостанцией радиосети 1. Далее на основе матрицы взаимных удалений с использованием выражения

$$\Delta f_{\text{доп } ij} = \begin{cases} \Delta f_0 \cdot \left(\frac{r_0^2}{r_{ij}^2} - 1 \right)^{\frac{\lg \mu}{3}} & \text{при } r_{ij} \leq r_0; \\ 0 & \text{при } r_{ij} > r_0, \end{cases}$$

формируется матрица допустимых частотных расстройк $\|\Delta f_{\text{доп } ij}\|$ $i, j = (\overline{1, N})$, $i \neq j$, обеспечивающих ЭМС для всех пар РЭС,

где Δf_0 — ширина полосы сигнала;

r_0 — расстояние взаимодействия РЭС при $f_{\text{доп}} = 0$ (под этим значением понимается максимальная дальность связи радиостанции);

r_{ij} — взаимное удаление РЭС (из матрицы взаимных удалений);

μ — коэффициент прямоугольности АЧХ приемника.

Следующая стадия заключается в формировании исходных данных для расчета затуханий радиосигнала, вызванных рельефом местности (рис. 4). Специфика радиосвязи при распространении земной волной в УКВ диапазоне состоит в том, что качество и сама возможность ведения связи сильно зависят от рельефа местности на трассе распространения радиоволн [6–8]. В связи с этим, необходимо учитывать эту особенность при распределении частот. Формирование исходных данных осуществляется в два шага:

- работа с электронной картой, снятие профилей местности с учетом высот подвеса антенн;
- определение необходимых параметров, представленных в табл. 1.

В конечном итоге сеть радиосвязи, представленную на рис. 1, можно представить в виде модели, изображенной на рис. 5.

Выходными данными представленной модели будет являться массив радиосетей, представленный набором как шаблонных, так и уникальных данных, позволяющих получить полное представление об объекте исследования с точки зрения вопроса распределения и назначения частот. Пример такого информационного массива представлен в табл. 2–4.

	$P/\text{ст}_{1.1}$	$P/\text{ст}_{1.2}$	...	$P/\text{ст}_{27.1}$	$P/\text{ст}_{27.2}$	...	$P/\text{ст}_{N.n}$
$P/\text{ст}_{1.1}$	$r_{1.1/1.1}$	$r_{1.1/1.2}$	...	$r_{1.1/27.1}$	$r_{1.1/27.2}$	...	$r_{1.1/N.n}$
$P/\text{ст}_{1.2}$	$r_{1.2/1.1}$	$r_{1.2/1.2}$	...	$r_{1.2/27.1}$	$r_{1.2/27.2}$	...	$r_{1.2/N.n}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$P/\text{ст}_{27.1}$	$r_{27.1/1.1}$	$r_{27.1/1.2}$	...	$r_{27.1/27.1}$	$r_{27.1/27.2}$	...	$r_{27.1/N.n}$
$P/\text{ст}_{27.2}$	$r_{27.2/1.1}$	$r_{27.2/1.2}$	...	$r_{27.2/27.1}$	$r_{27.2/27.2}$	...	$r_{27.2/N.n}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$P/\text{ст}_{N.n}$	$r_{N.n/1.1}$	$r_{N.n/1.2}$	...	$r_{N.n/27.1}$	$r_{N.n/27.2}$	...	$r_{N.n/N.n}$

Рис. 3. Матрица взаимных удалений

	$P/\text{ст}_{1.2}$	...	$P/\text{ст}_{27.1}$	$P/\text{ст}_{27.2}$	...	$P/\text{ст}_{N.n}$
1.1	—	...	$\Delta f_{\text{доп } 1.1/27.1}$	$\Delta f_{\text{доп } 1.1/27.2}$	...	$\Delta f_{\text{доп } 1.1/N.n}$
1.1	—	...	$\Delta f_{\text{доп } 1.2/27.1}$	$\Delta f_{\text{доп } 1.2/27.2}$	...	$\Delta f_{\text{доп } 1.2/N.n}$
...	...	...	...	...	...	...
1.1	$\Delta f_{\text{доп } 27.1/1.2}$	...	—	—	...	$\Delta f_{\text{доп } 27.1/N.n}$
1.1	$\Delta f_{\text{доп } 27.2/1.2}$	...	—	—	...	$\Delta f_{\text{доп } 27.2/N.n}$
...	...	...	...	...	...	...
1.1	$\Delta f_{\text{доп } N.n/1.2}$	...	$\Delta f_{\text{доп } N.n/27.1}$	$\Delta f_{\text{доп } N.n/27.2}$	...	—

Рис. 4. Матрица минимальных частотных расстройк

Таблица 1

Перечень параметров, определяемых из профиля радиотрассы для расчета затуханий

№ п/п	Для открытых трасс	Для полуоткрытых трасс	Для закрытых трасс
1	Аппроксимации участка отражения	Расстояние между РЭС абонентов (R)	Расстояние между РЭС абонентов (R)
2	Расстояние между РЭС абонентов (R)	Расстояние до вершины препятствия (R_n)	Расстояние до вершины препятствия (R_n)
3	Расстояние до точки отражения (R_0)	Реальный просвет над точкой отражения (H)	Реальный просвет над точкой отражения (H)
4	Реальный просвет над точкой отражения (H)	Высота хорды сферы, аппроксимирующей препятствие (Δy)	Протяженность препятствия (l_n)
5	Высота хорды сферы, аппроксимирующей местность (Δh)		Высота хорды сферы, аппроксимирующей препятствие (Δy)

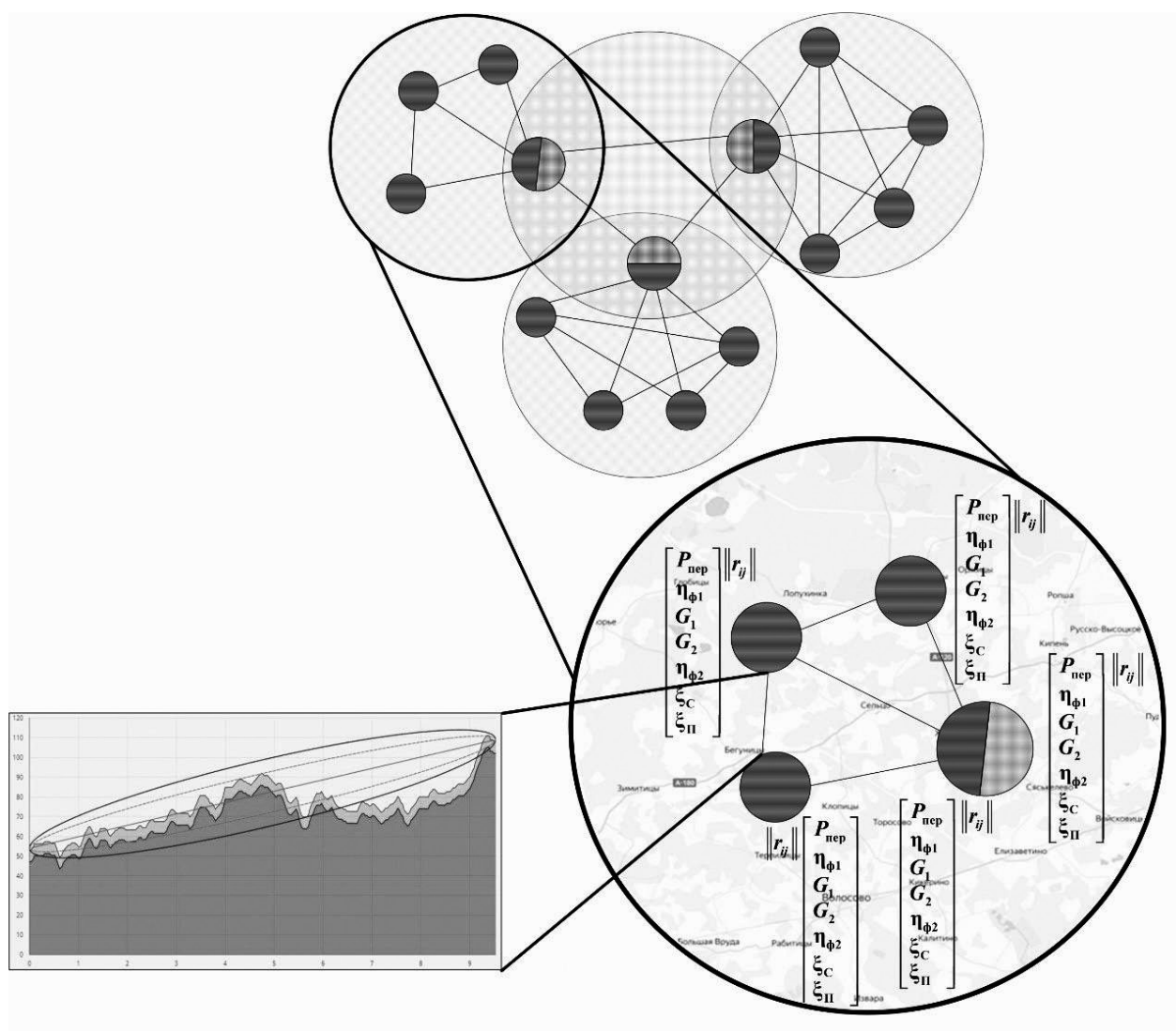


Рис. 5. Модель сети радиосвязи

Таблица 2

Массив профилей сетей радиосвязи рассматриваемой модели

Номер профиля	Вид РЭС (табл. 3)	Пары РЭС образующие радионаправления (табл. 4)	Вид сети	Режим работы	Приоритет
...	...	...	...	...	...
Радиосеть 27 «Сеть ...»	Р/ст 27.1 – Р-187П1	Р/ст 27.1 – Р/ст 27.2	Сеть прямой связи	ППРЧ	Да/нет (определяется для профилей с ФЧ)
	Р/ст 27.2 – Р-187П1				
	...	Р/ст 27.1 – Р/ст 27.3			
	Р/ст 27.N – Р-187П1	...			
...	...	...	...	...	...

Под шаблонными понимаются данные, остающиеся без изменений при различных вариантах построения радиосетей, к ним, например, можно отнести ТТХ РЭС.

Уникальные — напрямую зависят от положения приемопередающего устройства на карте местности, ввиду чего всегда принимают различные значения (номиналы минимальных частотных расстроек и др.).

Взяв за основу выходные данные модели и значение частотного номинала, рассматриваемого для назначения конкретной радиосети, производится расчет затуханий и учет замираний радиосигнала согласно блок-схеме на рис. 6. Блок $H \geq H_0$ означает, что реальный просвет над точкой отражения радиосигнала от рельефа местности (H , м) больше или равен величине критического просвета над точкой отражения (H_0 , м). Данное неравенство означает, что профиль местности представлен открытой трассой. Формула расчета затуханий радиосигнала W_{Pi} на открытой трассе имеет вид:

$$W_{Pi} = 10 \lg \left[1 + \Phi_3^2 - 2\Phi_3 \cos \left(\frac{\pi}{3} h_0^2 \right) \right],$$

где Φ_3 — модуль эффективного коэффициента отражения;

h_0 , м — относительный просвет над точкой отражения [10].

$$h_0 = H/H_0,$$

где H , м — реальный просвет над точкой отражения (определяется из чертежа профиля местности);

H_0 , м — величина критического просвета над точкой отражения.

$$H_0 = \sqrt{\frac{R\lambda k(1-k)}{3}}, \quad (1)$$

где R , км — расстояние между РЭС абонентов;
 λ , м — длина волны рассматриваемого номинала частоты;
 k — относительная координата точки отражения.

Далее проверяется выполнение условия:

$$\Delta h_{\max} \geq \Delta h, \quad (2)$$

где $\Delta h_{\max}$, м — максимально допустимая высота неровностей, при которой отражение можно считать зеркальным:

$$\Delta h_{\max} \cong 0,75 \frac{H_0}{h_0}. \quad (3)$$

Если условие (2) выполняется, то происходит зеркальное отражение радиоволны от препятствия и в таком случае $\Phi_3 = 1$.

Если условие (2) не выполняется, то в зависимости от подстилающей поверхности и пересеченности местности находят величину Φ_{30} (табл. 5) и полагают, что $\Phi_3 = \Phi_{30}$ — при аппроксимации области отражения плоскостью (участок местности представляет собой протяженный плоский участок).

В случае, когда область отражения радиосигнала аппроксимируется сферой (участок местности является выпуклым) по формуле (3) определяют величину $\Delta h_{\max}$ и проверяют выполнение условия (2).

Если условие (2) выполняется, то поверхность отражающего участка считается гладкой, то есть $\Phi_{30} = 1$ и $\Phi_3 = D$.

Таблица 3

Параметры, получаемые исходя из вида РЭС

Вид РЭС	Вид антенны	Место размещения	Δf	$f_{\text{сн}}$	$f_{\text{пн}}$	P	$\xi_{\text{с}}$	$\eta_{\text{ф}}$	μ	r_0	Матрица взаимных расстояний	Матрица минимальных частотных расстроек
Р-187П1	АШ-27/520-Н	В руках										
	АШ-100/520-ПН	Крыша здания (5 м)										
	АШ-136/520-П	...										
	...											
	АВК											

Таблица 4

Параметры, получаемые из профиля трассы

Пары РЭС образующие радионаправление	Параметры профиля местности											
	открытая трасса						полукрытая трасса			закрытая трасса		
	вид аппроксимации	R	R_0	H	h	R	R_n	H	y	R	R_n	H
Р/ст 27.1 – Р/ст 27.2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

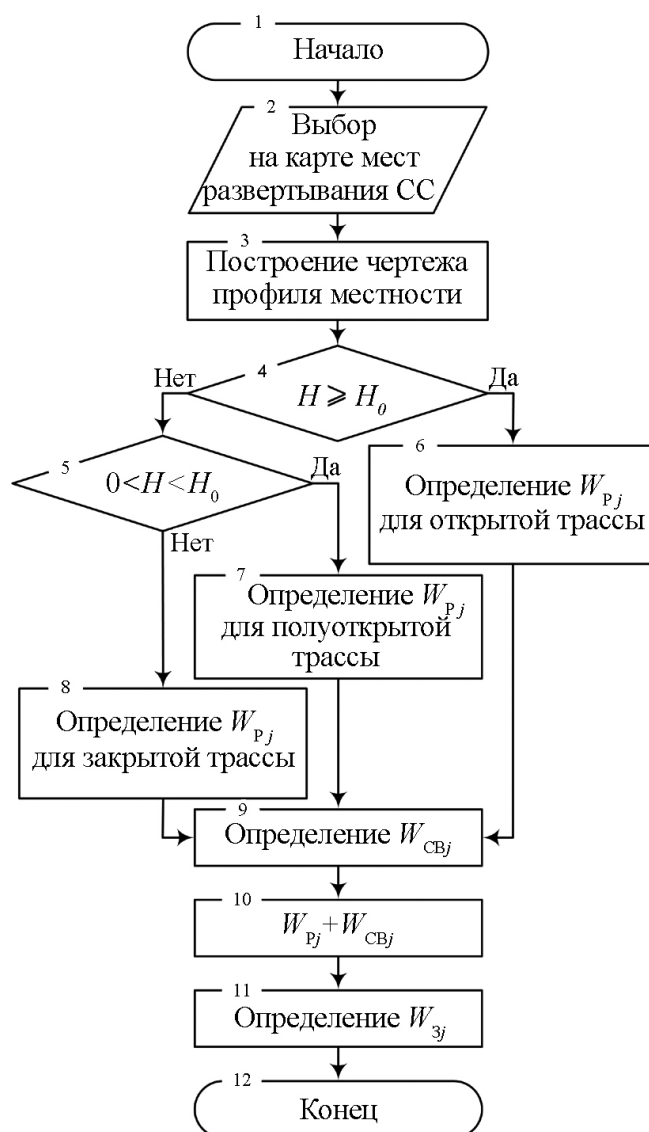


Рис. 6. Блок-схема расчета затуханий и учета замираний радиоволн

Таблица 5

Значения эффективного коэффициента отражения для различных типов подстилающей поверхности

Вид подстилающей поверхности	Степень шероховатости	Длина волны, м	
		1–0,5	0,2
Малопересеченная равнина, пойменные луга, солончаки	$\Delta h_{\max} < \Delta h < H_0$	0,95	0,9
Малопересеченная равнина, покрытая лесом	$\Delta h_{\max} < \Delta h < H_0$	0,9	0,7
Среднепересеченная открытая местность	$\Delta h > H_0$	0,7	0,5
Среднепересеченная местность, покрытая лесом	$\Delta h > H_0$	0,6	0,3

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4k^2(1-k)^2 R^2}{aH}}},$$

где D — величина коэффициента расходимости, учитывающего уменьшение модуля коэффициента отражения за счет расхождения пучка при отражении от сферической поверхности Земли;

a — радиус кривизны сферы, аппроксимирующей участок отражения:

$$a = \frac{l_0^2}{8\Delta y},$$

где Δy — высота хорды сегмента аппроксимирующей сферы.

$$l_0 = R \frac{\sqrt{1+h_0^2}}{1 + \frac{h_0^2}{4k(1-k)}}.$$

Если выполняется условие $\Delta h_{\max} < \Delta h < H_0$, то $\Phi_3 = \Phi_{30} \cdot D$, где Φ_{30} выбирается из табл. 5.

При условии аппроксимации области отражения радиосигнала окружностью земной поверхности, в ситуации когда величина неровностей $\Delta h = 0$, происходит зеркальное отражение от земной поверхности, следовательно, $\Phi_3 = D$. Если в пределы участка отражения попадают неровности, то их рассматривают как отклонение от сферической поверхности с радиусом a_3 (эквивалентный радиус Земли). Далее проверяется выполнение условия (1) и в зависимости от его выполнения, пересеченности местности и типа подстилающей поверхности определяется Φ_{30} (табл. 5). Затем аналогично случаю аппроксимации области отражения сферой определяется Φ_3 .

При наличии двух участков отражения определяются затухания для каждого участка W_{p1} и W_{p2} . При условии, когда знаки затуханий одинаковы и их сумма $(\Phi_{31}^2 + \Phi_{32}^2) \leq 1$, то величина затуханий составит $W_{pi} = W_{p2} + W_{p1}$. Если же $(\Phi_{31}^2 + \Phi_{32}^2) > 1$, то $\Phi_3 = 1$, и учитывается большее по величине затухание (W_{p1} или W_{p2}).

Если исходя из профиля местности имеет место неравенство вида $0 < H < H_0$, то в данном случае расчет затуханий радиоволн следует производить для полукрытых трасс:

$$W_{pi} = \left[6 + \frac{16,4}{\sqrt{1/\rho} (1 + 0,8\sqrt{1/\rho})} \right] (1 - h_0), \quad (4)$$

где ρ — относительный радиус кривизны препятствия, определяется как:

$$\rho = \frac{S_0}{R_{p1}} + \frac{S_0}{R_{p2}},$$

где S_0 — масштаб относительных расстояний;
 R_{p1} и R_{p2} — реальные расстояния до точек радиогоризонтов.

$$S_0 = \sqrt[3]{\frac{a^2 \lambda}{\pi}};$$

$$R_{p1} \cong R_1 + \frac{aH}{R_1}; \quad R_{p2} \cong R_2 + \frac{aH}{R_2}.$$

В ситуации когда на профиле местности несколько препятствий и расстояние между их вершинами $< 0,1R$, по формуле (4) вычисляются затухания на каждом препятствии и общее затухание будет равно $W_p = W_{p1} + W_{p2}$. Если же расстояние между вершинами препятствий $> 0,1R$ проверяется возможность их объединения одним эквивалентным препятствием. Для этого вычисляется значение порогового коэффициента $k_{\text{пор}}$:

$$k_{\text{пор}} = \frac{0,9 + |0,5 - \max(k_l, k_n)|^{1,8}}{3,2},$$

где $k_l = R_l / R$ — относительная характеристика левого препятствия;

$k_n = R_n / R$ — относительная характеристика правого препятствия. Если $k_l + k_n \geq k_{\text{пор}}$, то два препятствия объединяются.

Для закрытых трасс характерно неравенство вида $H \leq H_0$. В данном случае, когда значение относительного просвета над точкой отражения $h_0 \geq -3$ затухание рассчитывают по формуле (4), в противоположном случае, при $h_0 < -3$, расчет значения затухания радиоволн производится с использованием выражения:

$$W = W(u) + W(\rho) + W(t),$$

где $W(u)$ — затухание на полуплоскости, вычисляемое по формуле оптической дифракции Фриделя;

$W(\rho)$ — затухание, обусловленное закругленностью вершины препятствия;

$W(t)$ — затухание, вызванное протяженностью закругленной вершины.

Указанные затухания вычисляются по следующим формулам:

$$W(u) = 6,4 + 20 \lg \left[\sqrt{(0,816|h_0|)^2 + 1} + 0,816|h_0| \right];$$

$$W(\rho) = 7,2\sqrt{\rho} - 2\rho + 3,6\sqrt{\rho^3} - 0,8\rho^2;$$

$$W(t) = \begin{cases} 12t & \text{при } 0 \leq t \leq 4; \\ 17,1t - 6,2 - 20 \lg t & \text{при } t > 4, \end{cases}$$

где $t = l_{\text{верш}} / S_0$ — относительная протяженность вершины препятствия;

$l_{\text{верш}} \approx a|H| / Rk(1 - k)$ — протяженность вершины препятствия.

В случае, когда на трассе распространения радиоволн два препятствия и для одного из препятствий справедливо неравенство вида $Hn \geq H_0(n)$, то величина затухания для этого препятствия $W_{p1} = 0$. Для ситуаций, когда $0 < Hn < H_0(n)$, затухание рассчитывается по формуле (4).

Если прямая, соединяющая двух абонентов на профиле местности, пересекает сразу оба препятствия, то $l_{\text{верш}}$ рассчитывается на участке $(R - R_2^{(2)})$ — для первого препятствия и $(R - R_1^{(1)})$ — для второго, вместо протяженности трассы R . Здесь $R_2^{(2)}$ расстояние от правого края профиля местности до вершины второго препятствия, а $R_1^{(1)}$ — от левого края до вершины первого препятствия.

Далее, согласно блок-схеме на рис. 6, подставляя в формулу номинал рассматриваемой частоты, производится расчет затухания радиосигнала в свободном пространстве:

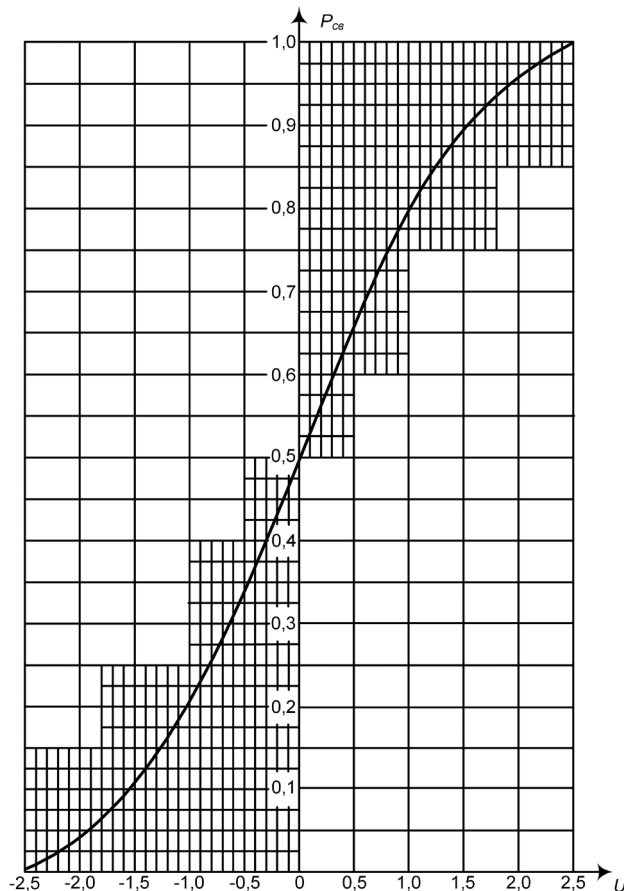


Рис. 7. Интегральная функция нормального распределения нормированной случайной величины

$$W_{\text{св}} = 10 \lg \left(\frac{4\pi R_i}{\lambda} \right)^2 = 122 + 20 \lg \frac{R_i}{\lambda}.$$

На следующем этапе происходит определение значения замирания радиосигнала [5]:

$$W_{3i} = z_2 + U\sigma_z,$$

где z_2 — дополнительное превышение уровня сигнала над уровнем помех, необходимое для обеспечения требуемого качества в условиях быстрых замираний;

U — некоторый расчетный параметр;

σ_z — среднеквадратическое отклонение превышения уровня сигнала над уровнем помех.

$$z_2 = z_{\text{тр}} - z_1,$$

где $z_{\text{тр}}$ — требуемое превышение уровня сигнала над уровнем помех на входе приемника;

z_1 — необходимое превышение медианных значений сигнала над помехой на входе приемника в канале связи без замираний (обычно определяется заводом-изготовителем РЭС).

В канале связи с быстрыми замираниями радиосигнала для достижения 95–98 % надежности связи необходимо обеспечить примерно следующие дополнительные превышения сигнала над помехой z_2 [3]:

– в декаметровом диапазоне волн при работе ионосферными волнами — 8–10 дБ;

– в диапазоне метровых волн при дальностях трасс, превышающих 25–30 км — 2–12 дБ.

В зависимости от требуемого значения вероятности связи $P_{\text{св тр}}$, по графику на рис. 7 можно найти соответствующее ей значение U .

Среднеквадратическое отклонение σ_z определяется разбросами параметров радиолиний (мощностей передатчиков и антенно-фидерных устройств (АФУ) и множителей ослабления на трассах. Для практических расчетов можно рекомендовать следующие ориентировочные значения σ_z [5]:

– декаметровый диапазон при связи ионосферными волнами — 10–16 дБ;

– метровый диапазон 5–8 дБ при дальностях, меньших или равных 30 км, 7–12 дБ при дальностях, больших 30 км.

Следующим этапом, согласно блок-схеме на рис. 6, является сложение значений, полученных в результате расчета затухания радиоволн за счет влияния рельефа местности, затухания в свободном пространстве.

Ввиду того, что распределение уровней сигнала и помех во времени подчиняются случайному закону, вероятность связи определяется выражением [4]:

$$P_{\text{св}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В случае, когда значение вероятности связи неизвестно, расчетный параметр U находится по формуле:

$$U = (\bar{z} - z_{\text{тр}}) / \sigma_z,$$

где $\bar{z}$ — отношение медианных значений мощности сигнала к мощности шумов и помех на входе приемника:

$$\bar{z} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}} + P_{\text{п}}} \right).$$

Мощность полезного сигнала на входе приемника определяется при помощи уравнения радиопередачи. При расчетах значение $P_{\text{с}}$ удобно выражать в децибелах относительно ватта.

$$P_{\text{с}} = P_{\text{лс}} + \eta_{\text{лс}} + G_{\text{лс}} + W_0 + W_{\text{т}} + |\zeta_{\text{п}}| + G_{\text{2с}} + \eta_{\text{ф2с}} + \zeta_{\text{с}}, \quad (5)$$

где подстрочная единица означает принадлежность к передающему тракту, а двойка — к приемному.

$$P_{\text{ш}} = k_{\text{б}} B (T_{\text{а}} + T_{\text{прм}}),$$

где $k_{\text{б}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·К) — постоянная Больцмана;

B — полоса частот;

$T_{\text{а}}$ — шумовая температура антенны;

$T_{\text{прм}}$ — шумовая температура приемника.

Нахождение значений шумовых температур антенны и приемника подробно описаны в работе [3].

В случае, когда на вход приемника воздействуют преднамеренные или непреднамеренные помехи, их значения вычисляются аналогично

формуле (5), за исключением того, что все переменные, имеющие отношение к передающему тракту, берутся из ТТХ «мешающих» РЭС.

Таким образом разработанная модель сети радиосвязи, представленная в виде набора радиосетей с массивом данных, дающим полное представление о их составе и особенностях построения, позволяет получить все необходимые значения для расчета вероятности связи, как показателя электромагнитной совместимости, и в дальнейшем стать основой для реализации методики оптимального распределения частотного ресурса.

Список источников

1. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. 61 с.
2. Силин Д.М. Задача назначения частот с условиями взаимных влияний общего вида // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 28–35.
3. Липатников В.А., Кулешов И.А. Управление радиочастотным спектром радиоэлектронных средств. СПб.: ВАС, 2011. 384 с.
4. Вахлаков В.Р., Рожков А.Г., Сосунов Б.В. и др. Основы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств; под ред. Б.В. Сосунова. СПб.: ВАС, 1991. 207с.
5. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчета радиоканалов. СПб.: ВАС, 1991. 110 с.
6. Шанин А.М. Методика управления ресурсами радиолинии, образованной от передающего радиопередатчика // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 46–53.
7. Мешалкин В.А., Викторов В.А., Пилюгин А.А. Проблема электромагнитной совместимости — следствие научно-технического прогресса // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 12. С. 71–77.
8. Вихарев Е.В., Ерышев В.Г., Шабуня В.В. Динамическое распределение частотного ресурса между сетями радиосвязи // Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Национальная экономика и вооруженные

силы: проблемы и перспективы». СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.

9. Бабков В.Ю., Вознюк М.А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. СПб.: СПб ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2000. 224 с.

References

1. GOST 24375–80. Radio communication. Terms and definitions. Moscow: USSR State Committee on Standards, 1987. 61 p.
2. Silin D.M. The problem of assigning frequencies with general mutual influence conditions // Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. 2018. No 1. Pp. 28–35.
3. Lipatnikov V.A., Kuleshov I.A. Radio frequency spectrum management of electronic equipment. St. Petersburg: VAS, 2011. 384 p.
4. Vakhlov V.R., Rozhkov A.G., Sosunov B.V. et al. Fundamentals of ensuring electromagnetic compatibility of electronic equipment edited by Sosunov B.V. St. Petersburg: VAS, 1991. 207 p.
5. Meshalkin V.A., Sosunov B.V. Fundamentals of energy calculation of radio channels. SPb.: VAS, 1991. 110 p.
6. Shanin A.M. Methodology for managing the resources of a radio link formed from a transmitting radio center // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 11–12 (185–186). Pp. 46–53.
7. Meshalkin V.A., Viktorov V.A., Pilyugin A.A. The problem of electromagnetic compatibility is a consequence of scientific and technological progress. Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences. 2019. No 12. Pp. 71–77.
8. Vikharev E.V., Eryshev V.G., Shabunya V.V. Dynamic distribution of frequency resource between radio communication networks // Proceedings of the II All-Russian scientific-practical conference: «National economy and armed forces: problems and prospects». SPb.: State Technical University, 2000.
9. Babkov V.Yu., Voznyuk M.A. Mobile communication networks. Frequency-territorial planning. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruевич, 2000. 224 p.