

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ РЛС НА ФОНЕ МАСКИРУЮЩИХ ПОМЕХ

С.А. ГОРШКОВ, П.И. ОРГИШ, Е.Н. БУЙЛОВ, Ю.С. ФИЛЬЧУК

Представлена методика расчета дальности действия РЛС сантиметрового-миллиметрового диапазонов длин волн по маловысотным объектам на фоне совокупности маскирующих помех, с учетом затухания радиоволн в атмосфере. Рассмотрено уточненное трансцендентное уравнение дальности для маловысотных объектов на фоне совокупности помех. Приведены методики расчета мощности пассивных помех от подстилающей поверхности и гидрометеоров; методики определения дальности действия при наличии тумана и других метеообразований.

Ключевые слова: мешающие отражения, дальность действия радиолокационной станции.

ВВЕДЕНИЕ

Дальность действия – важная статистическая характеристика радиолокационных станций (РЛС), зависящая от параметров РЛС, наблюдаемых объектов, наличия и особенностей различного рода помех, а также от условий распространения радиоволн (РРВ) [1–5]. Перечень условий, в которых необходимо обнаруживать цели, может содержать разные группы параметров. Наибольшее их число необходимо учитывать при расчете дальности обнаружения маловысотных и наземных целей РЛС сантиметрового-миллиметрового диапазонов длин волн с учетом затухания в атмосфере, на фоне одновременно воздействующих маскирующих активных и пассивных помех, с учетом их компенсации.

Уравнение дальности действия РЛС не имеет при этом аналитического решения, но может быть решено одним из численных методов, используемых в вычислительных пакетах программ высокого уровня (MathCAD, MATLAB, Maple, Mathematica и др.). Возможно применение удлиненной итеративной процедуры расчета с учетом только затухания, аналогичной трехшаговой итеративной методике Л.Блэйка [15], с учетом ее модификации Д.Бартоном [3]. Третьим, и наиболее общим вариантом решения уравнения дальности при наличии всех видов помех, является графо-аналитическая методика, предложенная Д.Бартоном в работах [3, 16].

Рассматривать будем лишь импульсные РЛС, обеспечивающие однозначное определение дальности цели. Дальность действия непрерывных и квазинепрерывных РЛС требует отдельного анализа, выходящего за рамки данной статьи.

Метеоусловия, в которых проводятся радиолокационные наблюдения, затрудняют обнаружение движущихся объектов наличием на трассе распространения гидрометеоров, таких как туман, дождь, снег или град. Каждая из перечисленных разновидностей гидрометеоров может наблюдаться как по отдельности, так и в различных сочетаниях (например, туман с дождем или

снегом). Наличие тумана и дождя требует, кроме расчета интенсивности мешающих отражений, учета затухания радиоволн на данных типах гидрометеоров. При этом оказывается, что если для определения затухания радиоволн в тумане по семействам графиков [1–4] необходимо использовать данные о метеорологической дальности видимости (МДВ), то для расчета мешающих отражений от того же самого облака тумана необходимо знать его водность [3]. Общепринятой характеристикой тумана, оглашаемой в метеосводках, является его МДВ. Поэтому требуется решать задачу пересчета МДВ в тумане в его водность.

Мешающие отражения от подстилающей поверхности (земной или водной) практически всегда присутствуют на приземной трассе распространения. Задача определения дальности обнаружения на их фоне имеет изящное решение [5]. Однако дальность действия РЛС на фоне *одновременно* присутствующих объемно и поверхностно распределенных мешающих отражений не определяется аналитическими методами. Если же цель дополнительно является постановщиком активной шумовой помехи (АШП) и наблюдается на фоне совокупности АШП по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА), то задача еще более усложняется.

Целями данной работы являются:

1. Описание методики составления трансцендентного уравнения дальности действия *импульсных* РЛС на фоне *совокупности* маскирующих пассивных и активных помех *с учетом рефракции и ослабления* сигнала в атмосфере для его решения одним из численных методов.

2. Уточнение аналитических методик расчета удельных эффективных отражающих поверхностей (ЭОП) поверхностно [3, 6–8] и объемно распределенных [3, 4, 9] мешающих отражателей.

3. Сопоставление предлагаемой методики с известными: трехитеративной Л. Блэйка – Д.Бартона [3, 15] и графоаналитической Д.Бартона [3, 16].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно [1–3, 5], дальность действия активной однопозиционной РЛС зависит от нескольких групп параметров, связанных:

- с РЛС (P_0 – импульсная мощность передатчика; T_0 – длительность импульса; ν_{II} – эффективность устройства когерентного накопления сигнала; $G_{РПУ}$, $G_{РПРУ}$ – коэффициенты направленного действия для передающей и приемной антенн; $g_{РПУ}(\beta, \varepsilon)$, $g_{РПРУ}(\beta, \varepsilon)$ – нормированная диаграмма направленности передающей и приемной антенн; $\eta_{РПРУ}$ – нормированный средний уровень боковых лепестков приемной антенны; λ – длина волны; N_0 – спектральная плотность мощности (СПМ) внутренних шумов; K_{Π} – коэффициент потерь в приемно-передающем тракте РЛС);

- с целью (σ_{Π} – ЭОП цели);

- с наличием активных помех (мешающих излучений – МИ) (N_a – СПМ источника помехи; $g_{\text{ш}}(\beta, \varepsilon)$ – нормированная диаграмма направленности постановщика помехи; $\eta_{РПРУ}$ – нормированный средний уровень боковых лепестков приемной антенны; $\nu_{АКП}$ – эффективность устройства когерентной компенсации МИ);

- с наличием мешающих отражений (МО) и возможностью их компенсации (α_s и α_v – удельная ЭОП поверхностно и объемно распределенных мешающих отражателей в окрестности цели и с учетом возможной неоднозначности определения дальности; ν_I – эффективность когерентной компенсации МО);

- с условиями РРВ (B – коэффициент затухания в дБ/км радиоволны при распространении в атмосфере с учетом наличия в ней различных примесей – гидрометеоров, пыли; $F_3(\varepsilon)$ – множитель Земли, учитывающий многолучевость распространения над подстилающей поверхностью; $R_{\text{экв}}$ – эквивалентный радиус Земли, учитывающий тропосферную рефракцию).

За основу возьмем методику расчета, изложенную А.Е. Охрименко в [5], дающую близкие к практике результаты на фоне различных помех.

Дальность обнаружения цели на фоне собственных шумов приемника со СПМ N_0 при требуемом отношении сигнал-шум $\rho(D, F)$ на выходе когерентного накопителя равна [5, 10]:

$$r = \frac{r_0}{\sqrt[4]{\rho(D, F)}}, \quad (1)$$

где $r_0 = \sqrt[4]{\frac{P_0 T_0 \nu_{II} \cdot G_{РПУ} G_{РПРУ} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_{\Pi}}{(4\pi)^3 \cdot N_0}}$ – (2)

опорная дальность обнаружения (при $\rho(D, F) = 1$); D , F – требуемые условные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги.

Потери энергии в приемно-передающем тракте РЛС увеличивают требуемое отношение сигнал-шум $\rho(D, F)$ в K_{Π} раз [3].

Отклонение цели от максимума ДНА и ее форму учитывают введением нормированной характеристики направленности на прием и передачу по полю $g_{РПУ}(\beta, \varepsilon)$ и $g_{РПРУ}(\beta, \varepsilon)$ [1]. При $g_{РПУ}(\beta, \varepsilon) = g_{РПРУ}(\beta, \varepsilon)$, выражение (1) принимает следующий вид:

$$r = \frac{r_0}{\sqrt[4]{\rho(D, F) K_{\Pi}}} g(\beta, \varepsilon). \quad (3)$$

Затухание радиоволн на молекулах кислорода, парах воды и гидрометеорах (дождь, туман) учитывают введением удельного множителя ослабления B [дБ/км]. Для *однородных трасс* и *однопутевого распространения* [1]

$$F_A(r) = 10^{-0.1Br}. \quad (4)$$

С учетом (4), выражение для дальности действия (3) становится трансцендентным

$$r = \frac{r_0}{\sqrt[4]{\rho(D, F) K_{\Pi}}} g(\beta, \varepsilon) \cdot 10^{-0.05Br}. \quad (5)$$

Наличие внешних помех (активных шумовых само- или внешнего прикрытие, пассивных поверхностно или объемно распределенных) уменьшает дальность действия. Так как для импульсных РЛС их мощность (за исключением АШП внешнего прикрытие) зависит от дальности до обнаруживаемой цели r , то уравнение (3) имеет частные аналитические решения лишь при наблюдении на фоне только одного вида помех [5] и без учета затухания сигнала в атмосфере (4).

В дальнейшем получим обобщенное трансцендентное уравнение для расчета дальности действия РЛС на фоне совокупности маскирующих помех, с учетом затухания в атмосфере. Затем уточним особенности расчета характеристик гидрометеоров с использованием обновленных данных [3]. Приведем аналитические выражения для расчета удельного ослабления сигнала в дожде B_d и тумане B_t (ослабление на молекулах кислорода и парах воды определяется по-прежнему графическим способом). И затем рассмотрим численный пример использования разработанной методики.

2. ОБОБЩЕННОЕ УРАВНЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ РЛС

Под обобщенным уравнением дальности действия РЛС здесь будем понимать уравнение, в общем случае не имеющее аналитического решения, учитывающее: наличие всех видов маскирующих помех; потери в приемно-передающем тракте РЛС; влияние ДНА и затухания сигнала в атмосфере; зеркальные переотражения от подстилающей поверхности (в пределах от нуля градусов до первого дифракционного максимума).

Влияние МИ и МО на дальность действия импульсных РЛС учитывается соответствующим увеличением СПМ внутренних шумов N_0 при воздействии: АШП внешнего прикрытие $N_{\text{шп}}(r_{\text{ш}})$ с дальности $r_{\text{ш}}$ (с учетом эффективности

их автокомпенсации $v_{AKП}$ и уровня боковых лепестков ДНА $\eta_{бок}$); АШП самоприкрытия с СПМ $N_{шсп}(r)$, зависящих от дальности цели r ; поверхностно $N_s(r) = \sigma_s^2(r) / \Delta f_0 v_{Is}$ и объемно $N_v(r) = \sigma_v^2(r) / \Delta f_0 v_{Iv}$ распределенных МО в полосе Δf_0 (после их компенсации в системе селекции движущихся целей с эффективностью v_{Is} и v_{Iv}):

$$N_{0\Sigma}(r) = N_0 + N_{шсп}(r_{ш}) + N_{шсп}(r) + N_s(r) + N_v(r). \quad (6)$$

Вынесем в данном выражении СПМ шума приемника за скобки и представим отношения СПМ внешних помех к N_0 в виде зависящих и не зависящих от дальности слагаемых:

$$\frac{N_{шсп}(r_{ш})}{N_0} = \frac{N_{ш} G_{ш} G_{РПРy} \lambda^2}{N_0 (4\pi)^2 r_{ш}^2 v_{AKП}} \eta_{бок} 10^{-0.1Br_{ш}} = \xi_{шсп}(r_{ш}) \quad (7)$$

относительная СПМ остатков компенсации АШП внешнего прикрытия;

$$\frac{N_{шсп}(r)}{N_0} = \frac{N_{ш} G_{ш} G_{РПРy} \lambda^2}{N_0 (4\pi)^2 r^2} \cdot 10^{-0.1Br} = \frac{W_{Aсп}}{r^2} \cdot 10^{-0.1Br} \quad (8)$$

относительная СПМ АШП самоприкрытия;

$$\frac{N_s(r)}{N_0} = \frac{P_0 G_{РПУ} G_{РПРy} \lambda^2 \alpha_s \Delta \beta}{N_0 (4\pi)^3 r^3 \Delta f_0 v_{Is}} \cdot \frac{c T_0}{2} \cdot 10^{-0.2Br} = \frac{\alpha_s}{r^3} \cdot W_s \cdot 10^{-0.2Br} \quad (9)$$

относительная СПМ остатков от компенсации поверхностно распределенных МО;

$$\frac{N_v(r)}{N_0} = \frac{P_0 G_{РПУ} G_{РПРy} \lambda^2 \alpha_v \Delta \beta \Delta \varepsilon}{N_0 (4\pi)^3 r^2 \Delta f_0 v_{Iv}} \cdot \frac{c T_0}{2} \cdot 10^{-0.2Br} = \frac{\alpha_v}{r^2} \cdot W_v \cdot 10^{-0.2Br} \quad (10)$$

относительная СПМ остатков от компенсации объемно распределенных МО.

Влияние многолучевого распространения на форму ДНА учитывают множителем Земли $g_3(\varepsilon)$ на передачу и прием [1], который зависит от угла места цели ε , свойств подстилающей поверхности и длины волны λ . Однако, при симметричной характеристике направленности антенны и наблюдении целей над гладкой поверхностью, множитель Земли можно выразить через дальность действия r , высоту цели $H_{ц}$ и длину волны λ :

$$g_3(r, H_{ц}) = 4\pi H_{ц} / r\lambda. \quad (11)$$

С учетом (6) – (11), дальность действия РЛС по маловысотным целям, наблюдаемым в

области нижней кромки ДНА, на фоне активных и пассивных помех, с учетом затухания сигнала в атмосфере можно определить численно из выражения:

$$r = \frac{r_0 10^{-0.05Br} g(\beta, \varepsilon)}{\sqrt[4]{\rho(D, F) K_{п}}} \cdot g_3(\varepsilon) \times \quad (12)$$

$$\frac{1}{\sqrt[4]{1 + \xi_{шсп}(r_{ш}) + \frac{W_{шсп}}{r^2} 10^{-0.1Br} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{W_s}{r} \cdot \alpha_s + W_v \cdot \alpha_v \right) 10^{-0.2Br}}}$$

При отсутствии того или иного вида помех соответствующее слагаемое в знаменателе выражения (12) обращается в нуль.

Определим теперь входящие в (12) значения удельных ЭОП поверхностно α_s и объемно α_v распределенных мешающих отражателей.

3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ ЭОП ПОВЕРХНОСТНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Для расчета удельной ЭОП поверхности суши α_s , при углах скольжения $\psi \leq 30^\circ$ в диапазоне частот f от одного до ста ГГц, может быть использовано полуэмпирическое соотношение, предложенное на основе аппроксимации экспериментальных данных Г.П. Кулеминым и В.Б. Разказовским [6, 8]:

$$\alpha_s(f, \psi), \text{ дБ} = A_1 + A_2 \lg(\psi/20) + A_3 \lg(f/10) \quad (13)$$

$$[\text{М}^2/\text{М}^2].$$

Здесь углы скольжения ψ выражены в градусах, а частота f – в ГГц.

Параметры поверхности $A_1 - A_3$ определяются из табл. 1 для согласованной горизонтальной поляризации. Для согласованной вертикальной поляризации значения $\alpha_s(f, \psi)$ увеличивают на 2...3 дБ, а для кроссовой – снижают на 10...15 дБ.

Таблица 1

Тип суши \ Параметры, дБ/м ²	A ₁	A ₂	A ₃
Бетон	-49	32	20
Пашня	-37	18	15
Снег	-34	25	15
Лиственный лес летом до дождя	-20	10	6
Лиственный лес после дождя	-15	10	6
Лиственный лес зимой	-40	10	6
Хвойный лес, летом и зимой	-20	10	6
Луг с травой, высотой > 0.5 м	-21	10	6
Луг с травой, высотой < 0.5 м	-(25-30)	10	6
Городские и сельские здания	-8.5	5	3

Удельная ЭОП морской поверхности под малыми углами [3] зависит от критического угла скольжения $\psi_{кр} = \lambda / 0.02 K_B^3$, где K_B – степень волнения моря в баллах, выраженная по шкале Бофорта (см. табл. 2):

$$\alpha_s = \begin{cases} \gamma_m \sin \psi & \text{для } \psi > \psi_{кр}; \\ \gamma_m \psi (\psi / \psi_{кр})^4 & \text{для } \psi \leq \psi_{кр}, \end{cases} \quad (14)$$

где $10 \lg \gamma_m = 6K_B + 10 \lg \lambda - 64$ [дБ].

Таблица 2

Баллы	0	1	2	3
Скорость ветра, м/с	до 0.5	0.5...1.5	2...3	3.5...5
Баллы	4	5	6	7
Скорость ветра, м/с	5...8	8.5...10	11...13.5	14...16.5
Баллы	8	9	10	11 / 12
Скорость ветра, м/с	17...20	20.5...23.5	24...27.5	28...31.5/ 32 и более

Формула (14) не учитывает поляризационных различий, наблюдаемых для частот $f < 10$ [ГГц] [3]. Поправку для горизонтальной поляризации вводят, считая, что (14) относится к вертикальной: $\alpha_s^Г \approx \alpha_s^В - 1.08(10 - f)$ [дБ]. Кроссполяризационная составляющая меньше горизонтальной на 10 дБ.

ЭОП больше при наблюдении против ветра, чем по ветру [4]:

- на 2...4 дБ ($\lambda = 25$ и 75 см) для всех поляризаций;
- на 3дБ ($\lambda = 3$ см) для вертикальной и на 10 дБ для горизонтальной поляризаций.

В сантиметровом-миллиметровом диапазонах сказываются дополнительные отражения от брызг и появляющиеся всплески, учитываемые моделью [6].

4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ ЭОП ГИДРОМЕТЕОРОВ

Выражение для расчета удельной ЭОП гидрометеоров имеет вид [1]:

$$\alpha_v = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right|^2 \cdot z, \quad [M^2/M^3], \quad (15)$$

где z – отражаемость, $[M^6/M^3]$, ε – диэлектрическая проницаемость воды.

В литературе [11] отражаемость выражают в mm^6/m^3 или логарифмических единицах $10 \lg(z)$ относительно $1 mm^6/m^3$ и обозначают [дБz]. Значения z , имеющие в (15) такую размерность, переводят в разы и домножают на $(10^{-3})^6 = 10^{-18}$.

Отражаемость для гидрометеоров в виде осадков (дождь, снег, град) зависит от их интенсивности J [мм/ч] и для излучения-приема на горизонтальной поляризации определяется выражением [1, 2]:

$$z = A \cdot J^b, \quad [mm^6/m^3]. \quad (16)$$

В умеренных широтах $A = 200$, $b = 1,6$ для дождя и $A = 2000$, $b = 2$ для сухого снега. Отражаемость мокрого снега в 6...10 раз больше, чем сухого. Выражения для расчета отражаемости града приведены в [4]. Поляризационные свойства осадков связаны с их типом и интенсивностью [9], и частично приведены в табл. 3.

Вид осадков	$z_{ГГ}$, [дБz]	$z_{ГГ} / z_{ВВ}$, [дБz]	$z_{ГВ} / z_{ВВ}$, [дБz]
Морось	<25	0...0.7	< -32
Дождь	25...60	0.5...4	-25...-34
Сухой снег	<35	0...0.5	< -34
Плотный снег	<25	0...5	-25...-34
Мокрый снег	<45	0...3	-10...-20
Сухая снежная крупа	25...35	-0.5...1	< -25
Мокрая снежная крупа	30...50	-0.5...3	-20...-30
Влажный град (< 2 см)	50...60	-0.5...0.5	< -20
Влажный град (> 2 см)	55...70	-0.5...0.5	-10...-15
Дождь с градом	50...70	-1...6	-10...-20

Отражаемость гидрометеоров в виде тумана и облаков рассчитывается через их удельную водность M по следующей формуле [2]:

$$z = 4.8 \cdot 10^{-8} \cdot M^2, \quad [mm^6/m^3],$$

где удельная водность M выражается в $[mg/m^3]$.

О свойствах тумана зачастую известно из сообщения метеослужб о метеорологической дальности видимости (МДВ) $D_{МВ}$, [м]. МДВ определяется как максимальная дальность в данном направлении, на которой еще можно распознать невооруженным глазом в дневное время рельефный темный объект на фоне неба, а в ночное время – несфокусированный источник света умеренной интенсивности. Удельная водность тумана M связана с МДВ следующим соотношением [3]:

$$M = 303.6 \cdot D_{МВ}^{-1.43}, \quad [г/м^3]. \quad (17)$$

Отражаемость тумана можно представлять через МДВ, пересчитывая водность из $[г/м^3]$ в $[mg/m^3]$:

$$z_T = 4.424 \cdot 10^3 \cdot D_{МВ}^{-2.86}, \quad [mm^6/m^3]. \quad (18)$$

Отражаемость облаков зависит от их типа, высоты и других факторов. Пределы значений отражаемости z в сантиметровом диапазоне волн составляют, например [1], для слоистых облаков от -30 до 0 дБz, для слоисто-, мощно-, и высоко-кучевых – от -30 до 30 дБz, для слоисто-дождевых – от -30 до 40 дБz, кучево-дождевых – от -10 до 60 дБz. При этом максимальные значения отражаемостей приходится на высоты от 1 до 2 км, постепенно убывая до минимума на высотах 7 – 10 км [12].

Над морем размеры водяных капель в облаках на 30% больше, чем над сушей [13]. Вертикальная протяженность облаков от 100 ... 200 м до 14 ... 16 км, а горизонтальная – от единиц до сотен километров.

5. ОСЛАБЛЕНИЕ СИГНАЛА, ВНОСИМОГО ЧИСТОЙ АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОМЕТЕОРАМИ

Поглощение и рассеяние радиоволн каплями воды нарастает пропорционально несущей частоте. Для миллиметровых и сантиметровых

волн эти эффекты существенны, а на дециметровых и более длинных волнах влияние дождя резко уменьшается. Удельное поглощение взвешенными в воздухе каплями воды превышает суммарное удельное поглощение кислородом и водяным паром атмосферы. Приведем вначале исходные данные для расчета дальности действия в чистой атмосфере на частотах до 400 ГГц [3, 14]. Затем рассмотрим методику расчета удельного ослабления в дожде, справедливую при уменьшении длины волны до 1 мм [6]. И завершим описание полуэмпирическими аналитическими соотношениями для удельного ослабления в тумане, расширенного в [13] до частот свыше 30 ГГц.

Удельное ослабление в чистой атмосфере

Поглощение и рассеяние волн в тропосфере приводят к удельному ослаблению энергии сигнала, измеряемому в дБ/км. Удельное ослабление энергии радиоволн при ясной погоде несущественно для дециметровых и более длинных волн.

Удвоенное удельное ослабление радиоволн B при ясной погоде представлено на рис. 1, в зависимости от несущей (в диапазоне от 0.1 до 400 ГГц). Цель находится на уровне моря при плотности водяного пара 7.5 г/м³ [3, 14].

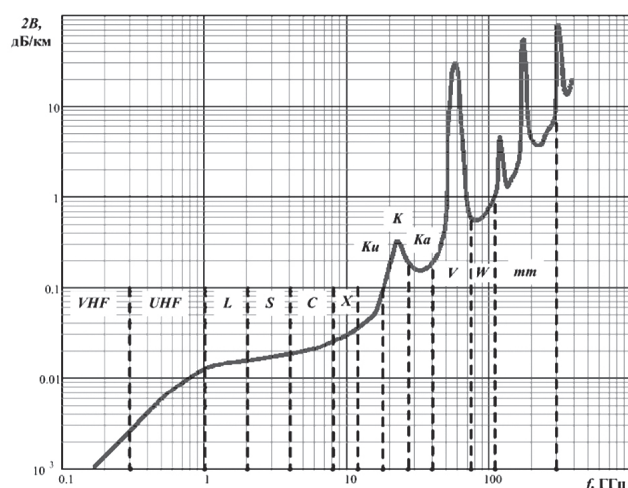


Рис. 1. Удвоенное удельное ослабление радиоволн в атмосфере при ясной погоде на уровне моря при плотности водяного пара 7.5 г/м³

Удельное ослабление в дожде

Для упрощения расчета удельного ослабления, входящего в выражение (4), можно использовать аппроксимирующую зависимость для интенсивности дождя $0.1 \leq J \leq 100$ мм/ч, которая записывается в следующем виде [4]:

$$B_d = m \cdot J^b, \quad (19)$$

где коэффициенты m и b зависят от длины волны, выраженной в метрах:

$$m = 3.054 \cdot \lambda^{0.0166} e^{-298.2 \cdot \lambda} - 1.667 \cdot \lambda - 4.929 \cdot 10^{-10} \cdot \lambda^3 + 0.0596;$$

$$b = 1.2 - 0.5 \cdot e^{-22500 \cdot \lambda^2}.$$

Погрешность аппроксимации в указанных диапазонах интенсивности дождей и при длинах радиоволн от 1 до 30 мм не превышает 10%.

Туманы характеризуются меньшими размерами капель, чем дожди. Поэтому их влияние сказывается сильнее на миллиметровых волнах, чем на сантиметровых [1]. Удельное ослабление в тумане B_T зависит от его удельной водности M , [г/м³], несущей частоты f , [ГГц] и температуры окружающей среды T , [°C] и аппроксимируется следующим выражением [3, 13]:

– при $f > 30$ ГГц

$$B_T = 0.5 \cdot M(-2.694 + 22.304 f^{-1} + 0.12 f - 0.044 T); \quad (20)$$

– при $f \leq 30$ ГГц

$$B_T = 4.87 \cdot 10^{-4} M \cdot f^2. \quad (21)$$

В (20) и (21) удельная водность тумана M может быть определена через МДВ в соответствии с (17).

6. РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ РЛС МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ

Рассчитаем дальность обнаружения РЛС со следующими исходными данными (с учетом обозначений, введенных в предыдущих разделах): $\lambda = 3.19$ мм; $P_0 = 192$ Вт; $N_0 = 1.35 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц; $K_n = 5$ Дб; $v_I = 30$ Дб; $v_{II} = N = 64$; используется сложный зондирующий сигнал с длительностью импульса $T_0 = 64$ мкс и шириной спектра $\Delta f_0 = 2$ МГц; $T_n = 500$ мкс; $\sigma_{ц} = 1$ м²; $D = 0,5$; $F = 10^{-5}$; ширина диаграммы направленности приемной (передающей) антенн в азимутальной и угломестной плоскостях $\Delta\beta = 2^\circ$ и $\Delta\epsilon = 5^\circ$ соответственно; температура окружающей среды $T = 20$ °C. На всем пути распространения – дождь, интенсивностью $J = 4$ мм/ч и туман с МДВ 100 м. Подстилающая поверхность – луг с высотой травы более 0.5 м. Угол скольжения $\psi = 0.05$ град. Земную поверхность примем шероховатой. Эффектом квазизеркального переотражения от поверхности раздела пренебрежем.

Расчет проведем в два этапа. Вначале сравним точность определения дальности по данной методике и итеративной табличной методике Л.Блэйка [2, 15], модифицированной Д. Бартоном [3, 16], учитывая лишь затухание в чистой атмосфере при наличии тумана. При этом, чтобы выяснить потенциальные возможности методики Блэйка–Бартона, не будем ограничивать число итераций двумя – тремя.

На втором этапе расчетов учтем наличие пассивных помех от земной поверхности, дождя и затухание в нем. Здесь итеративная табличная методика не будет использоваться. Для проведения расчетов в таких условиях Д. Бартоном разработана графическая методика [3, 16], в соответствии с которой находится точка пересечения зависящего от дальности отношения сигнал – по-

межа плюс шум с его требуемым значением. Здесь результаты предлагаемой методики для импульсной РЛС не сопоставляются с графической, так как при одинаковых исходных данных они дают одинаковый результат. Разница лишь в числе выполняемых итераций: последовательный полный перебор в методике Д. Бартона и число приближений при численном решении трансцендентного уравнения в предлагаемой методике.

Определим опорную дальность в соответствии с (2): $r_0 \approx 42$ км. В соответствии с (2) найдем требуемое отношение сигнал-шум с учетом потерь энергии в приеме-передающем тракте РЛС: $\rho = 49.3$. Согласно выражению (3), дальность обнаружения в свободном пространстве, с потерями энергии и при $g(\beta, \epsilon) = 1$, равна: $r \approx 15.8$ км. Решив трансцендентное уравнение (4), найдем дальность действия РЛС с учетом затухания радиоволн в атмосфере и тумане ($B_\Sigma = B_a + B_\tau = 1.966$ дБ/км): $r \approx 5.04$ км.

На рис. 2 приведена зависимость дальности обнаружения в аналогичных условиях от номера шага приближения в соответствии с методикой Блэйка-Бартона. Для анализа потенциальных возможностей методики число используемых шагов приближения увеличено от обычно используемых двух-трех до двадцати. Здесь же показан результат расчета в соответствии с уточненной методикой.

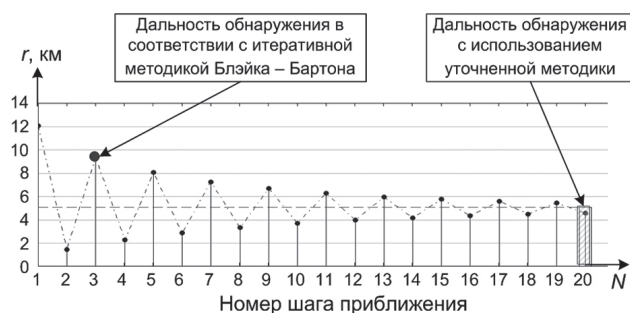


Рис. 2. Сравнение результатов расчета дальности обнаружения РЛС с использованием уточненной методики и методики Блэйка-Бартона

Из рисунка следует, что при большом суммарном ослаблении B_Σ методика Блэйка-Бартона дает результат по трем итерациям почти в два раза отличающийся от истинного значения. Близкий к истинному результат получается лишь после двадцати итераций. Подобные ситуации характерны именно для см-мм-диапазона волн, когда затухание в чистой атмосфере (см. рис. 1) и тумане существенно растет. При этом для более длинноволновых диапазонов двух-трех итеративная методика Блэйка-Бартона дает близкий к истинному результат.

Определим теперь дальность действия на фоне пассивных помех от слабого дождя с туманом и от подстилающей поверхности.

Удельная ЭОП подстилающей поверхности (в соответствии с (13)): $\alpha_s = 7.6 \cdot 10^{-5}$ м²/м².

Отражаемость дождя (см. (16)): $z_d = 1838$ мм⁶/м³.
 Отражаемость тумана (см. (18)): $z_\tau = 0.00843$ мм⁶/м³.
 Этим значением в дальнейшем можно пренебречь. Удельная ЭОП дождя из выражения (15) составит $\alpha_v = 4.6 \cdot 10^{-3}$ м²/м³.

Добавим к предыдущему значению B_Σ затухание в дожде согласно выражению (19): $B_d = 3.4$ дБ/км. Новое значение суммарного затухания $B_\Sigma = B_a + B_\tau + B_d = 5.39$ дБ/км. Тогда дальность действия РЛС, рассчитанная в соответствии с выражением (12): $r_{max} = 1.1$ км.

Аналогичный результат получаем и из графо-аналитической методики Бартона [3, 16], в которой последовательно сопоставляются требуемое и расчетное отношение сигнал – шум, зависящее от дальности. Однако данный результат требует значительно большего объема вычислений, так как выполняется расчет зависимости отношения сигнал – шум от дальности в пределах от некоторого минимального значения до r_0 с шагом, определяемым требуемой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено трансцендентное уравнение, корень которого определяет дальность действия наземных импульсных РЛС на фоне совокупности активных и пассивных маскирующих помех с учетом ослабления в атмосфере. Показано, что для сильных ослаблений (малые длины волн, туман) предложенный метод значительно повышает точность расчетов по сравнению с известным двух-трех-итеративным подходом Блэйка-Бартона.

В отличие от графо-аналитического решения [3, 16], предложенное уравнение содержит неизвестное расстояние до цели в явном виде. Оно легко решается, например, функцией $root(x)$ системы Mathcad и, в отличие от графоаналитической методики Д.Бартона, не требует построения графических зависимостей. Однако область использования предложенной методики, в отличие от методики Д.Бартона, ограничивается импульсными РЛС.

Литература

- [1] Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
- [2] Справочник по радиолокации : Пер. с англ. (в четырех томах) / под общей ред. К.Н.Трофимова. Том 1. Основы радиолокации; Под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
- [3] Barton David K. Radar system analysis and modeling. – Boston, London: Artech House, 2005. – 545 p.
- [4] Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
- [5] Охрименко А.Е. Теоретические основы радиолокации и РЭБ. Часть I. – М.: Воениздат, 1983. – 456 с.

- [6] *Kulemin G.P.* Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter. – Boston, London: Artech House, 2003. – 410 p.
- [7] *Винокуров В.И.* Морская радиолокация. – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.
- [8] *Кулемин Г.П., Разказовский В.Б.* Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – Киев: Наук. думка, 1987. – 262 с.
- [9] *Bringi V.N., Chandrasecar V.* Polarimetric Doppler Weather Radar. Cambridge University Press, 2002. – 663 p.
- [10] *Горшков С.А., Латушкин В.В., Седышев С.Ю.* Основы радиолокации: Конспект лекций. Ч. 2. – Минск: ВА РБ, 2004 г. – 177с.
- [11] *Довиак Р., Зрнич Д.* Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения : Пер. с англ. / Под ред. А.А. Черникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
- [12] Радиолокационные методы исследования Земли / *Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др.* Под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Советское радио, 1980. – 264 с.
- [13] *Nathanson F.E., Reilly J.P., Cohen M.N.* Radar Design Principles. – 2nd ed., N.-Y.: McGraw-Hill, 1999. – 720 p.
- [14] *Christiansen D.* Electronic Engineers Handbook, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1997. – 400 p.
- [15] *Blake L.V.* Radar Range – Performance Analysis/ – Norvuud, M.A.: Artech House, 1986.
- [16] *Barton David K.* Radar Equations for Modern Radar. – Boston, London: Artech House, 2013. – 428 p.

Поступила в редколлегию 16.12.2013

Горшков Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры радиолокации и приема-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Научные интересы: моделирование, обнаружение, измерение и распознавание локационных сигналов.

Оргиш Павел Иванович, магистр технических наук, аспирант кафедры радиолокации и приема-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Научные интересы: ММО (Multiple Input Multiple Output) радиолокационные системы, повышение скрытности и живучести средств активной локации.



Буйлов Евгений Николаевич, магистр технических наук, аспирант кафедры радиолокации и приема-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Научные интересы: моноимпульсные радиолокационные системы, измерение – распознавание локационных сигналов.



Фильчук Юлия Сергеевна, магистрант кафедры радиолокации и приема-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Научные интересы: обнаружение радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех.

УДК 621.396.96

Уточнена методика розрахунку дальності дії імпульсних РЛС на тлі маскуючих завад / С.А. Горшков, П.І. Оргіш, Є.М. Буйлов, Ю.С. Фільчук // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2014. – Том 13. – № 1. – С. 3–9.

Розроблено методику розрахунку дальності дії РЛС сантиметрового-міліметрового діапазонів довжин хвиль по маловисотних об'єктах на тлі сукупності маскуючих завад з урахуванням загасання радіохвиль в атмосфері. Розглянуто уточнене трансцендентне рівняння дальності для маловисотних об'єктів на тлі сукупності завад. Наведено методики розрахунку потужності пасивних завад від підстильної поверхні та гідрометеорів; методики визначення дальності дії за наявності туману та інших метеоутворень.

Ключові слова: відображення, що заважають, дальність дії радіолокаційної станції.

Табл.: 03. Іл.: 2. Бібліогр.: 16 найм.

UDC 621.396.96

The specified design procedure of range of pulse radars against the background of masking interferences / S.A. Gorshkov, P.I. Orgish, E.N. Byilov, Yu.S. Filchuk // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2014. – Vol. 13. – № 1. – P. 3–9.

The method of centimeter-millimeter wave band radar range calculation for low-height objects against the background of a sum of masking interferences taking into account radio waves attenuation is shown. The improved transcendental range equation for low-height objects against the sum of interferences background is considered. The methods of surface and precipitations clutter power calculation and the methods of range estimation in the presence of fog and other precipitations are shown.

Keywords: clutter, range of a radar station.

Tab.: 03. Fig.: 2. Ref.: 16 items.