

ПОМЕХИ РАДИОВОЛНОВОМУ СРЕДСТВУ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ В ЛЕСУ

Аннотация.

Актуальность и цели. Лесные массивы способствуют скрытному приближению нарушителей к важным охраняемым объектам. Поэтому обнаружение людей и техники в лесу является актуальной задачей. Для этого применяются радиоволновые средства обнаружения (РВСО) метрового диапазона длин волн. Помехой для РВСО являются отражения от раскачивающихся при ветре крон деревьев. В статье анализируется этот тип помехи.

Материалы и методы. Используется модель дерева в виде ущемленной консольной конусной балки с приложением силы ветра к ее верхнему концу. С использованием этой модели оценены отклонения кроны в горизонтальном и вертикальном направлениях при воздействии ветра. Модель помехи определена как результат интерференции прямого луча и луча, отраженного колеблющейся диффузной поверхностью массива крон деревьев.

Результаты. Рассмотрены два случая размещения РВСО – внутри лесного массива и у кромки лесного массива. Они отличаются направлением колебаний отражающей поверхности. Внутри массива эта поверхность горизонтальная и колеблется в вертикальном направлении. На краю массива эта поверхность вертикальная и колеблется в горизонтальном направлении. Амплитуда колебаний в горизонтальном направлении на порядок больше, чем в вертикальном. Установлено, что амплитуда помехи определяется главным образом не величиной отклонения отражающей поверхности, а ее коэффициентом отражения, зависящим от плотности крон деревьев, и углом падения.

Выводы. В диапазоне рабочих частот РВСО величина помехи на порядок ниже сигналов от человека-нарушителя и не мешает его обнаружению.

Ключевые слова: отклонение крон деревьев при ветре, отражающая поверхность массива крон, прямой и отраженный сигналы, приращения суммарного сигнала при колебаниях массива крон.

N. N. Tokarev

RADIO-WAVE DETECTOR INTERFERENCE IN THE FOREST

Abstract.

Background. Forests provide the covert approach of intruders to vital protected facilities. Therefore, the detection of people and equipment in the forest is an urgent task. To fulfill this, it is necessary to use radio-wave detectors (RWD) of the meter wavelength range. Interference to RWD is reflections from tree crowns swaying in the wind. The article analyzes this type of interference.

Materials and methods. It is used a tree model in the form of a pinched cantilever cone beam with application of wind force to its top. Using this model, the crown

deviations in horizontal and vertical directions are estimated when exposed to wind. The interference model is determined as a result of the direct beam interference and the beam reflected by the oscillating diffuse surface of an array of tree crowns.

Results. Two cases of detector location are considered - inside the forest and at the edge of the forest. They differ in the direction of oscillation of the reflecting surface. In the forest, this surface is horizontal and it oscillates in the vertical direction. At the edge of the forest, this surface is vertical and oscillates in the horizontal direction. The amplitude of oscillations in the horizontal direction is greater than in the vertical. It has been established that the amplitude of interference is mainly determined not by the amount of deviation of the reflecting surface, but by its reflection coefficient, which depends on the density of tree crowns, and the angle of incidence.

Conclusions. In the RWD operating frequency range the magnitude of the interference is much lower than the signals generated by an intruder (a person) and does not prevent his/her detection.

Keywords: inclination of tree crowns in the wind, reflecting surface of crown tract, direct and reflected signals, increment of signal for deflection of crown tract.

Введение

Наличие лесных массивов и растительности представляет собой естественные условия, способствующие скрытному приближению нарушителей к важным охраняемым объектам. Поэтому обнаружение людей и техники в лесу является одной из важных и сложных задач систем обеспечения безопасности этих объектов, а анализ возможностей и условий ее решения представляет собой очень актуальную задачу теории и практики систем охраны.

Применение для обнаружения людей и техники в лесу радиотехнических средств обнаружения (СО) ограничено наличием помех от раскачивающихся при ветре кустов и деревьев. Эти помехи максимально проявляются в СО диапазонов сверхвысоких частот (СВЧ), наиболее широко используемых в системах охраны. В настоящее время для блокирования участков лесистой местности используются радиоволновые СО (РВСО) метрового и дециметрового диапазонов волн [1–3]. На блокируемом участке между передатчиком (ПРД) и приемником (ПРМ) этих СО допускается наличие высокой травы, кустарника. Человек-нарушитель легко обнаруживается в этой растительности, а суммарная плотность подвижной травы, кустарника, ветвей деревьев между ПРД и ПРМ вблизи поверхности земли недостаточна для создания сколько-нибудь серьезных помех. Представляет интерес оценка влияния на РВСО раскачивающихся при ветре крон деревьев, образующих в сумме значительную отражающую поверхность для электромагнитных волн.

1. Характер движения крон при ветре

В лесном массиве ветер максимально действует на верхнюю часть дерева, чем ближе к поверхности земли, тем ветер слабее. Чем гуще лес, тем меньше скорость ветра. В густых лесах на высоте 2 м от земли скорость ветра может снижаться до 0,3 % от скорости в вершине дерева [4]. В этих условиях у достаточно крупных деревьев ствол остается почти неподвижным, а крона с ветвями и листьями отклоняется под действием ветра. На рис. 1 условно показано дерево с кроной в виде круга с заливкой светлого тона в исходном состоянии и более темного тона в отклоненном состоянии. Если отклонение кроны в горизонтальном направлении составляет x , а показанные пунктиром

диаметры кроны в первоначальном и отклоненном состоянии образуют равнобедренный треугольник, то из геометрических соображений отклонение кроны в вертикальном направлении составляет

$$z = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - x^2}, \quad (1)$$

где R_c – радиус кроны.

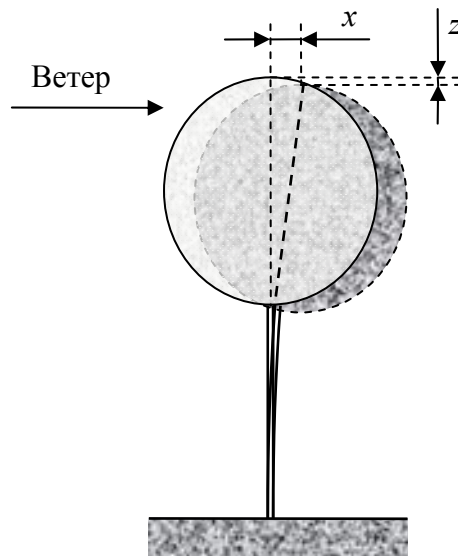


Рис. 1. Отклонение кроны дерева под действием ветра

Таким образом, при воздействии ветра, кроме смещения кроны в горизонтальном направлении на величину x происходит, смещение ее в вертикальном направлении (вниз) на величину z .

В лесном массиве при воздействии ветровой волны происходит смещение некоторого массива крон, как показано на рис. 2. Если вблизи этого массива находится РВСО, содержащее ПРД и ПРМ, разнесенные на некоторое расстояние, то от ПРД на ПРМ кроме прямой волны и других отраженных волн попадает волна, отраженная диффузной поверхностью, образованной кромками крон деревьев, как показано на рис. 2. Сигнал в ПРМ образуется в результате интерференции этих волн. При смещении отражающей поверхности изменяется длина пути отраженной волны, как показано на рис. 2 пунктирной и сплошной линиями, что приводит к изменению амплитуды сигнала ПРМ, представляющему собой помеху от воздействия ветра.

Возможны два варианта расположения РВСО относительно отражающей поверхности крон деревьев. Им соответствуют стрелки 1 и 2 с надписью «Ветер», показывающие направление ветра. В первом варианте РВСО располагается внутри лесного массива, ПРД и ПРМ находятся на некоторой высоте над землей ниже уровня крон деревьев на расстоянии от них $R = H - h$, где H – высота нижней кромки крон, h – высота расположения антенн РВСО. В этом случае рис. 2 следует рассматривать как вид сбоку, направление ветра на нем показано стрелкой 1, смещение кромки крон деревьев, показанное на рисунке, соответствует вертикальному смещению z сверху вниз. При этом на

участке ветровой волны уменьшаются средняя высота H крон над землей и расстояние R .

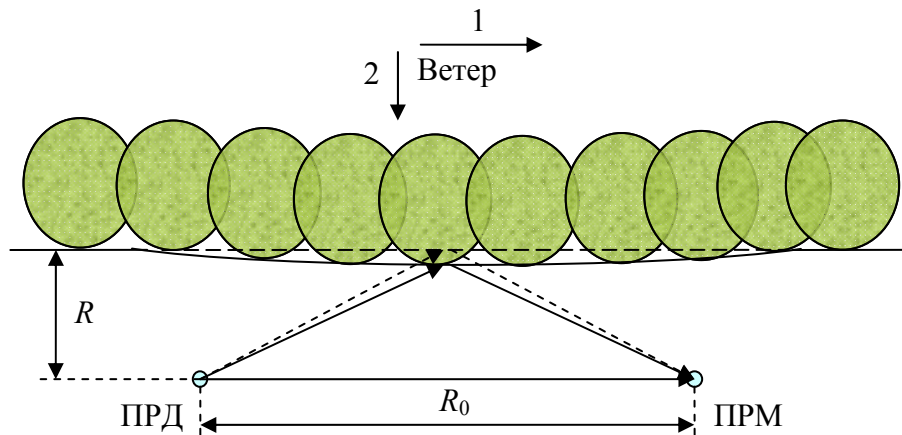


Рис. 2. Влияние смещения крон деревьев на распространение сигнала СО

Во втором варианте РВСО располагается у кромки леса на расстоянии R от нее. В этом случае рис. 2 следует рассматривать как вид сверху, направление ветра на нем показано стрелкой 2, смещение кромки крон деревьев, показанное на рисунке, соответствует горизонтальному смещению x с изменением расстояния R .

Смещение массива крон, образующих отражающую поверхность, зависит от скорости ветра V_v , характеристик деревьев, частоты n_t собственных колебаний деревьев.

Частота собственных колебаний дерева при моделировании его консольной балкой с фиксированным нижним концом и приложением силы к верхнему концу определяется его жесткостью k_r и массой m [5, 6]:

$$n_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{m}}.$$

Жесткость системы находится [6] из равенства:
– силы, изгибающей ствол дерева:

$$F_1 = \frac{3\pi \cdot E d^4 x}{32 l^3},$$

где E – модуль упругости древесины; d – диаметр ствола дерева; l – высота ствола; x – смещение наивысшей точки;
– и линейной восстанавливающей силы [5]:

$$F_2 = k_r x.$$

Из этого равенства ($F_1 = F_2$) следует

$$k_r = \frac{3\pi \cdot E d^4}{32 l^3}.$$

Выражая массу конусообразного ствола дерева через плотность древесины ρ_t и объем ствола, получаем

$$n_t = \frac{3d}{\pi\sqrt{32} \cdot l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_t}}.$$

На рис. 3 приведены зависимости собственной частоты трех типов деревьев от их высоты при одинаковом $d = 0,3$ м. Деревья различаются плотностью древесины ρ_t и модулем упругости E .

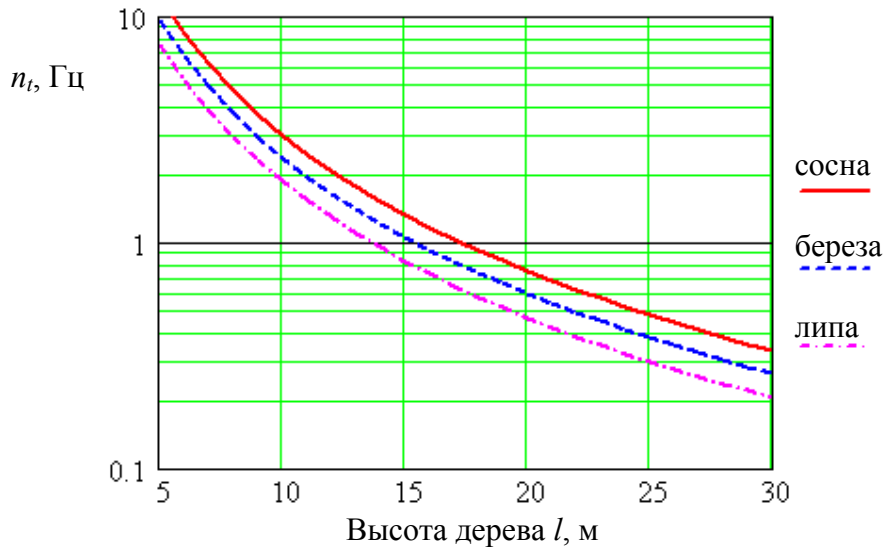


Рис. 3. Собственные частоты деревьев

Смещение крон деревьев x под действием ветра находится решением уравнения движения массы [7]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c_s \frac{dx}{dt} + k_r x = F(t),$$

где c_s – коэффициент сопротивления, $F(t)$ – сила, действующая на массу.

При гармоническом изменении силы $F(t) = F_0 \cos 2\pi n t$ решение уравнения в установившемся режиме [7] имеет вид:

$$x(t) = X(n) \cos(2\pi n t - \varphi),$$

где

$$X(n) = \frac{F_0}{k_r \sqrt{\left(1 - (n/n_t)^2\right)^2 + \frac{c_s^2}{k_r m} (n/n_t)^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{c_s (n/n_t)}{\sqrt{k_r m} \left(1 - (n/n_t)^2\right)}.$$

Амплитуда действующей на дерево силы F_0 определяется скоростным напором ветра и площадью кроны, на которую действует ветер.

Скоростной напор ветра равен

$$P_v = \rho_v V_v^2 / 2,$$

где $\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.

Площадь сечения кроны дерева берется с учетом ее плотности ρ_{oc} . В данном случае имеется в виду оптическая плотность кроны. По плотности различают три типа крон [8]:

- массивные, плотные (просветы составляют до 25 %, $\rho_{oc} > 0,75$);
- средней плотности (просветы составляют от 25 до 50 %, $0,5 \leq \rho_{oc} \leq 0,75$);
- легкие сквозистые (просветы составляют 50 % и более, $\rho_{oc} \leq 0,5$).

Площадь кроны, на которую действует скоростной напор ветра, составляет:

$$S_c = \pi \cdot R_c^2 \rho_{oc}$$

С учетом этого амплитуда действующей на дерево силы равна

$$F_0 = P_v S_c = \frac{\pi}{2} \cdot V_v^2 R_c^2 \rho_v \rho_{oc}. \quad (3)$$

Теперь с использованием формул (1) и (2) можно оценить амплитуду отклонения крон деревьев в вертикальном направлении при воздействии ветра:

$$Z(n) = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - X(n)^2}.$$

На рис. 4 приведены зависимости этого отклонения от частоты воздействующей силы при различном коэффициенте сопротивления c_s , определяющем демпфирование колебаний.

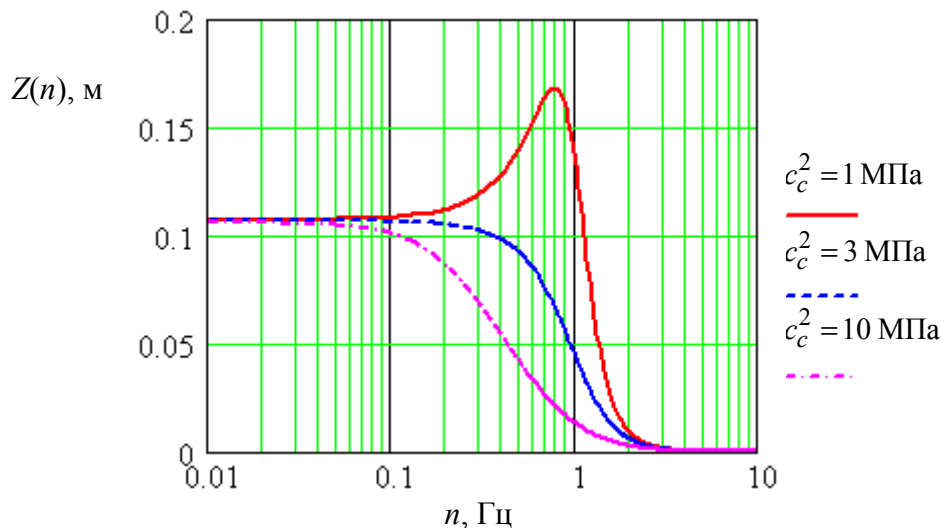


Рис. 4. Частотные характеристики смещения кроны дерева от ветра

Кривые на рисунке рассчитаны при следующих исходных данных: скорость ветра $V_v = 25$ м/с, высота дерева $l = 15$ м, диаметр ствола $d = 0,3$ м, радиус кроны $R_c = 3$ м, плотность кроны $\rho_{oc} = 0,7$, плотность древесины $\rho_t = 500$ кг/м³, модуль упругости древесины $E = 10$ ГПа. В последующих расчетах, если это не оговаривается, используются те же параметры древесины.

При этих данных частота собственных колебаний дерева $n_t = 1$ Гц. Как видно из рис. 4, частота максимума отклонений несколько не совпадает с частотой собственных колебаний, она равна $n_m = n_t \sqrt{1 - c_s^2 / (k_r m)}$ [9]. Частота максимума приближается к n_t при уменьшении демпфирования.

Отношение $c_s / (2\sqrt{k_r m})$ называют относительным демпфированием системы. Коэффициент $2\sqrt{k_r m}$ называют критическим коэффициентом демпфирования [7]. В зависимости от коэффициента сопротивления c_s колебания дерева будут резонансными при низком демпфировании либо апериодическими при высоком демпфировании.

Из опыта известно, что движение воздуха при ветре является негармоническим процессом, оно, как правило, имеет одно основное направление. При этом вершины деревьев после отклонения при порыве ветра возвращаются в исходное положение, а не отклоняются в противоположном направлении, что соответствует не резонансному, а апериодическому процессу. А для апериодического процесса, как следует из частотных характеристик, приведенных на рис. 4, максимальное отклонение кроны дерева имеет место при низких частотах воздействия. Проще говоря, при анализе помех от ветра в лесу следует использовать максимальное значение отклонения кроны при постоянном порыве ветра, соответствующем низкочастотному приближению выражения (2).

Приняв $n = 0$ Гц, из (2) получим

$$X_0 = F_0 / k_r . \quad (4)$$

Соответственно,

$$Z_0 = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - X_0^2} . \quad (5)$$

Низкочастотное приближение при $n = 0$ Гц соответствует случаю, когда постоянная сила ветра F_0 отклоняет крону дерева на постоянную величину X_0 , уравновешивая силу, обусловленную жесткостью k_r , стремящуюся вернуть крону на место.

На рис. 5 приведены зависимости смещения кроны в горизонтальном (X_0) и вертикальном (Z_0) направлениях от скорости ветра при высоте дерева $l = 25$ м (а) и от высоты дерева при скорости ветра $V = 25$ м/с (б). Горизонтальное смещение значительно превышает вертикальное. Полученные выражения для отклонения крон деревьев в лесу при воздействии ветра позволяют оценить влияние этих отклонений на РВСО.

2. Прямой сигнал РВСО метрового диапазона

В РВСО с диапазоном рабочих частот ниже 100 МГц обычно используются подземные или наземные горизонтальные симметричные антенны

в виде отрезков изолированного провода [10]. Такие антенны применены в РВСО, описанных в [2, 3]. Согласно [10] подземная горизонтальная антенна на глубине d_a (как передающая, так и приемная) может быть заменена фиктивной антенной, расположенной на поверхности земли, с таким же распределением тока, умноженным на коэффициент $\exp(-ik_2d_a)$.

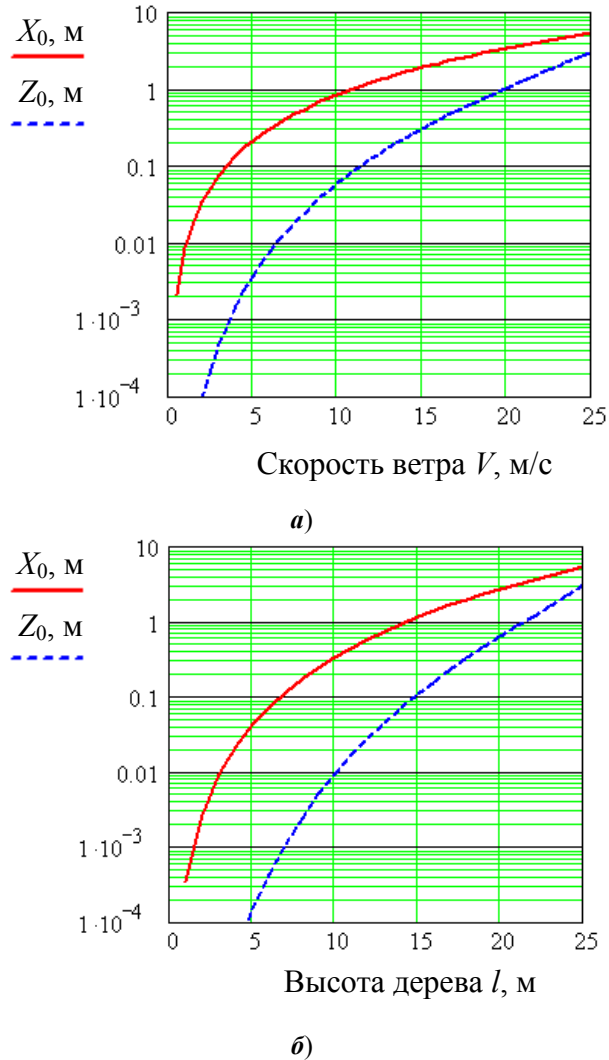


Рис. 5. Зависимости смещения кроны от скорости ветра (а) и высоты дерева (б)

У этого коэффициента: $k_2 = k_1 \sqrt{\epsilon_2'}$ – волновое число нижней среды (земли); $k_1 = 2\pi f/c$ – волновое число верхней среды (воздуха); $\epsilon_2' = \epsilon_2 - \frac{i\sigma_2}{2\pi \cdot f \epsilon_0}$ – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость земли; ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость земли; $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ (Ф/м) – диэлектрическая постоянная; σ_2 – удельная проводимость земли; f – частота; c – скорость света.

В работе [11] получены выражения для всех составляющих поля надземной проводной линии. К сожалению, принятые в этой работе допущения не позволяют определить горизонтальные составляющие поля при расположении и точек излучения, и точек приема на поверхности земли. Поэтому мы определим продольную по отношению к антенне составляющую поля через ее соотношение с вертикальной составляющей на границе раздела сред [10]:

$$E_{1x} = \frac{\sqrt{k_2^2 - k_1^2}}{k_1 \epsilon_2'} E_{1z} \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2'}} E_{1z}.$$

Такой прием использован в работе [12]. С учетом сказанного продольная составляющая поля, излученного ПРД, на поверхности земли вдоль оси антенн x определяется выражением

$$E_x(x, 0, 0) = \frac{60}{\epsilon_2'} e^{-ik_2 d_a} \cdot \int_{-L}^L [1 + ik_1(x - \xi)] \cdot \frac{e^{-ik_1 R_1}}{(x - \xi)^2} \cdot I(\xi) \cdot d\xi, \quad (6)$$

где

$$I(\xi) = \begin{cases} I_1(\xi) = I_0 \frac{\sin \gamma(L + \xi)}{\sin \gamma L} (-L \leq \xi \leq 0), \\ I_1(\xi) = I_0 \frac{\sin \gamma(L - \xi)}{\sin \gamma L} (0 \leq \xi \leq L) - \end{cases}$$

распределение тока вибратора передающей антенны по его длине;

I_0 – амплитуда тока; L – длина плеча вибратора антенны; γ – коэффициент распространения волны по антенне (с учетом [10] $\gamma \approx k_2$).

Прямой сигнал в приемной антенне находится интегрированием (6) по длине антенны с учетом множителя ослабления в земле:

$$U_d = e^{-ik_2 d_a} \cdot \left[\int_{-L}^0 \frac{\sin k_2(L + x)}{\sin k_2 L} E_x(R_0 + x) dx + \int_0^L \frac{\sin k_2(L - x)}{\sin k_2 L} E_{xr}(R_0 + x) dx \right], \quad (7)$$

где R_0 – расстояние между ПРД и ПРМ.

3. Влияние движения крон деревьев на РВСО внутри лесного массива

При расположении фиктивных антенн на поверхности земли $h = 0$ расстояние от линии антенн до кромки крон $R = H$, где H – высота крон (см. рис. 2). Для определения отраженного кронами деревьев сигнала продольную составляющую поля найдем напрямую из формулы, представленной в работе [11], с учетом нахождения фиктивной излучающей антенны на земле:

$$E_{x1}(x, y, z) = \frac{i30 \cdot k_1 z}{k_2} e^{-ik_2 d_a} \cdot \int_{-L}^L [2i + k_1 R_1] \cdot \frac{e^{-ik_1 R_1}}{R_1^3} \cdot I(\xi) \cdot d\xi, \quad (8)$$

где $R_1 = \sqrt{(x - \xi)^2 + y^2 + z^2}$; y – поперечная координата; z – вертикальная координата.

Как показано на рис. 2, излученная ПРД волна падает на отражающую поверхность, образуемую нижней кромкой крон деревьев, отражается от нее и попадает в ПРМ. Падающая волна на отражающей поверхности определяется в середине расстояния между ПРД и ПРМ в точке с координатами $(x = R_0/2, y = 0, z = H)$:

$$E_{xf} = E_{x1}(R_0/2, 0, H).$$

Отраженная от диффузной поверхности волна определяется коэффициентом отражения и углом падения [13]. Коэффициент отражения определим объемной плотностью кроны и сомкнутостью крон [4]:

$$\rho_c = \rho_{vc} \rho_{cd}.$$

Объемная плотность кроны равна

$$\rho_{vc} = \frac{V_{mc}}{V_c},$$

где V_{mc} – объем материала кроны; $V_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3$ – объем пространства, занимаемого кроной.

Объем материала кроны найдем из соотношений между относительными объемами составных частей дерева [14]:

$$V_{mc} = V_s \frac{v_c}{v_s},$$

где $V_s = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{d^2}{4} l$ – объем ствола; v_s – относительный объем ствола в общем объеме дерева; v_c – относительный объем материала кроны в общем объеме дерева.

Например, для сосны относительный объем ствола $v_s = 0,65 \dots 0,77$, а относительный объем ветвей $v_c = 0,08 \dots 0,1$ [14].

Сомкнутость крон (crown density) – отношение площади проекции крон ко всей площади участка леса [15], характеризует плотность всего массива крон:

$$\rho_{cd} = \frac{\pi \cdot R_c^2}{R_t^2},$$

где R_t – среднее расстояние между деревьями в лесу.

Отраженная от диффузной поверхности волна пропорциональна коэффициенту отражения и квадрату косинуса угла падения [13]. Косинус угла падения θ относительно нормали к поверхности равен (см. рис. 2):

$$\cos \theta = \frac{H}{\sqrt{H^2 + R_0^2/4}}.$$

К ПРМ отраженная волна попадает с набегом фазы, обусловленным пройденным расстоянием от точки отражения с координатами $(x = R_0/2, y = 0, z = H)$ до точки с координатами $(x, 0, 0)$:

$$R_2(x) = \sqrt{(x - R_0/2)^2 + H^2}.$$

В итоге напряженность поля на приемной антенне будет равна

$$E_{xr}(x) = E_{x1}(R_0/2, 0, H) \frac{H^2}{H^2 + R_0^2/4} \rho_c e^{-ik_1 R_2(x)}.$$

Напряжение приемной антенны определится интегрированием поля по длине антенны с учетом прохождения волной расстояния d_a в земле:

$$U_r = e^{-ik_2 d_a} \cdot \left[\int_{-L}^0 \frac{\sin k_2(L+x)}{\sin k_2 L} E_{xr}(R_0+x) dx + \int_0^L \frac{\sin k_2(L-x)}{\sin k_2 L} E_{xr}(R_0+x) dx \right]. \quad (9)$$

Суммарный сигнал ПРМ складывается из прямого сигнала (7) и отраженного от крон деревьев сигнала (9):

$$U_g = U_d + U_r.$$

Основными параметрами при исследовании влияния колебаний крон деревьев на принимаемый сигнал РВСО будут частота поля f , высота уровня крон H и ее изменение при ветре Z_0 , определенное выше (5).

Соотношение между прямым U_d и отраженным U_r сигналами в диапазоне частот при различной высоте крон H приведено на рис. 6.

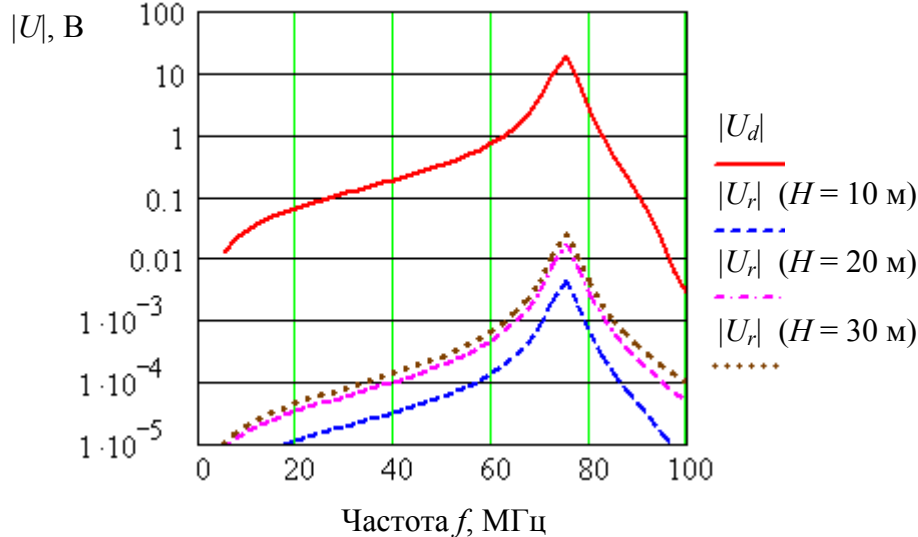


Рис. 6. Частотные зависимости сигналов РВСО

Кривые рассчитаны для случая сухой земли ($\epsilon_2 = 4, \sigma_2 = 10^{-3}$), при этом расстояние между ПРД и ПРМ $R_0 = 25$ м, длина плеча вибратора антенны

$L = 1$ м, глубина расположения антенн $d_a = 0,15$ м, амплитуда тока в антенне $I_0 = 0,25$ А. Отраженные сигналы во всем диапазоне частот ниже прямого сигнала на три порядка и более. Подъем всех сигналов на частоте около $f_0 = c/(\sqrt{\epsilon_2} 2L) = 75$ МГц соответствует резонансу антенн при сухой земле,

при мокрой земле резонанс отсутствует из-за больших потерь. Все нижеследующие расчеты, если это не оговаривается, выполнялись на частоте 50 МГц.

Отраженный сигнал, накладываясь на прямой сигнал, интерферирует с ним. На рис. 7,а показан результат интерференции – зависимость суммарного сигнала от высоты крон деревьев в виде нарастающего колебательного процесса. На рисунке приведена также огибающая этого процесса, представляющая собой сумму модулей прямого и отраженного сигналов без учета фаз. Эта огибающая соответствует максимально возможному отклонению сигнала при изменениях высоты крон относительно своего постоянного значения при воздействия ветра. Целесообразно отклонения сигнала при воздействии ветра от своего значения, представляющие собой помеху от воздействия ветра, выражать в относительных величинах. На рис. 7,б приведены зависимости отношения модулей отраженного и прямого сигналов $\Delta_1 = |U_r|/|U_d|$ от высоты крон при сухой и мокрой земле. Понятно, что это отношение характеризует только одностороннее отклонение, реальное отклонение сигнала может быть вдвое больше, поскольку отраженный сигнал может суммироваться с прямым сигналом и может вычитаться из него. Графики на рис. 7,б показывают увеличение влияния отраженного сигнала при мокрой земле более чем вдвое по сравнению с сухой землей.

Приращения сигнала РВСО максимальны, если отклонение $Z_0(V)$ высоты крон сравнимо или превышает период интерференционных колебаний, приведенных на рис. 7,а. При этом фаза интерференционных колебаний и форма (временная зависимость) помехи от воздействия ветра определяются начальной высотой крон. Чтобы это продемонстрировать, выразим приращения сигнала непосредственно в зависимости от скорости ветра. С учетом (3), (4) и (5) отклонения крон при ветре в горизонтальном и вертикальном направлениях равны:

$$X_0(V) = \frac{16l^3 R_c^2 \rho_v \rho_{oc}}{3d^4 E} \cdot V^2, \quad Z_0(V) = 2R_c - \sqrt{(2R_c)^2 - X_0(V)^2}. \quad (10)$$

Следует заметить, что при расчетах вертикальных отклонений крон деревьев по формуле (10) при большой скорости ветра нужно следить за знаком подкоренного выражения, задавая в исходных данных радиус кроны R_c .

Относительное приращение суммарного сигнала в зависимости от скорости ветра V , представляющее собой помеху от ветра, выражается формулой

$$\Delta_2(H, V) = \frac{|U_g(H - Z_0(V))|}{|U_g(H)|} - 1.$$

На рис. 8 приведены графики этих зависимостей для сухой земли при различной, но близкой по величине высоте крон H от 20 до 22 м. В нижней части рисунка приведена кривая зависимости вертикального отклонения крон

от скорости ветра $Z_0(V)$, позволяющая оценить интенсивность действия ветра. Кривые представляют собой форму помехи при увеличении скорости ветра от минимальной до 25 м/с и отклонении крон от 0 до 1,5 м. Как видно по форме кривых, фаза колебаний зависит от высоты крон, даже при небольшой разнице высот амплитуда и фаза колебаний значительно различаются.

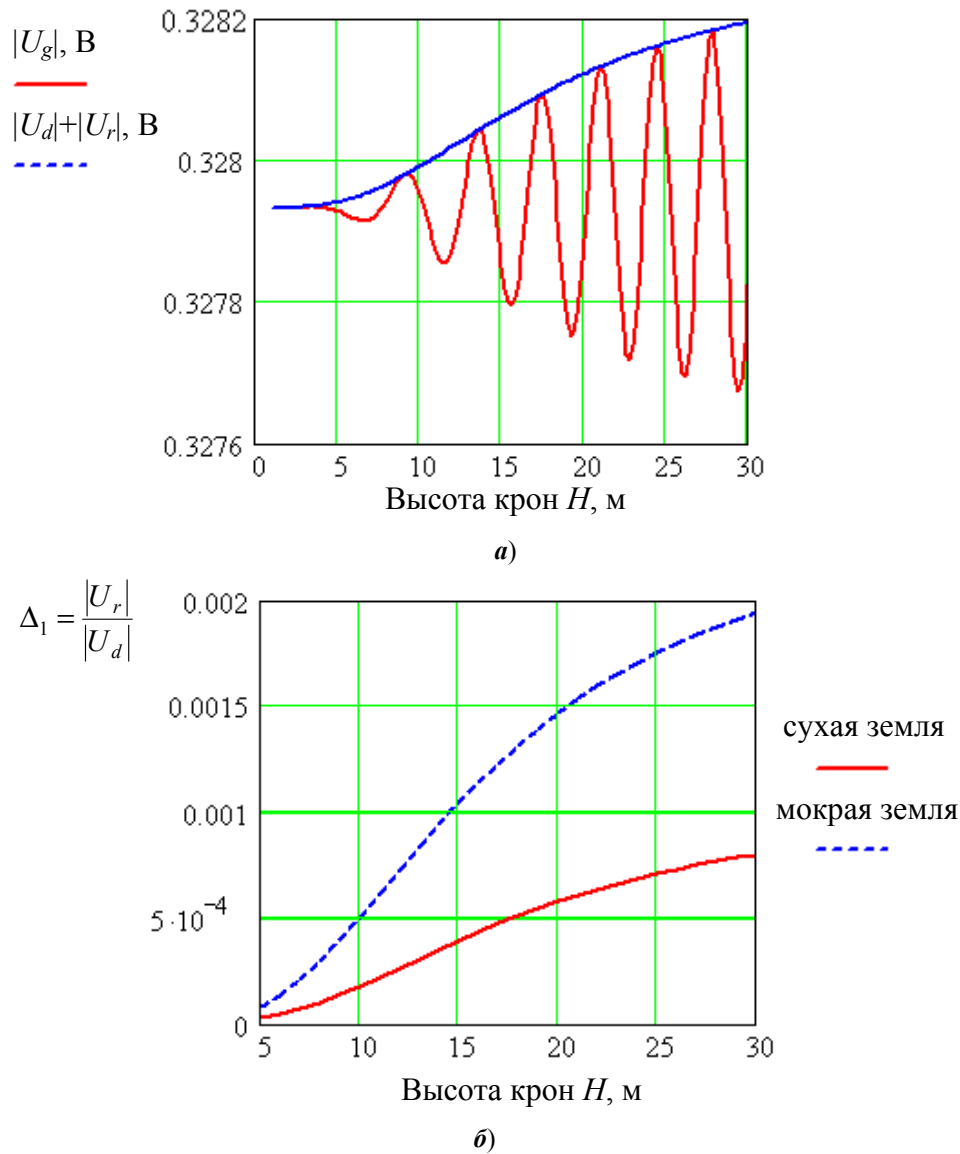


Рис. 7. Зависимости абсолютного (а) и относительного (б) приращений сигналов РВСО от высоты крон

Отклонения высоты крон могут достигать нескольких метров, как видно из рис. 5. Но изменения сигнала при этом не превышают величин, приведенных на рис. 7,б. Эти изменения определяются величиной отраженного сигнала, а значит, коэффициентом отражения электромагнитной волны от

диффузной поверхности, образуемой массой крон, а он определяется, как говорилось выше, плотностью крон и их сомкнутостью, а также углом падения волны на отражающую поверхность.

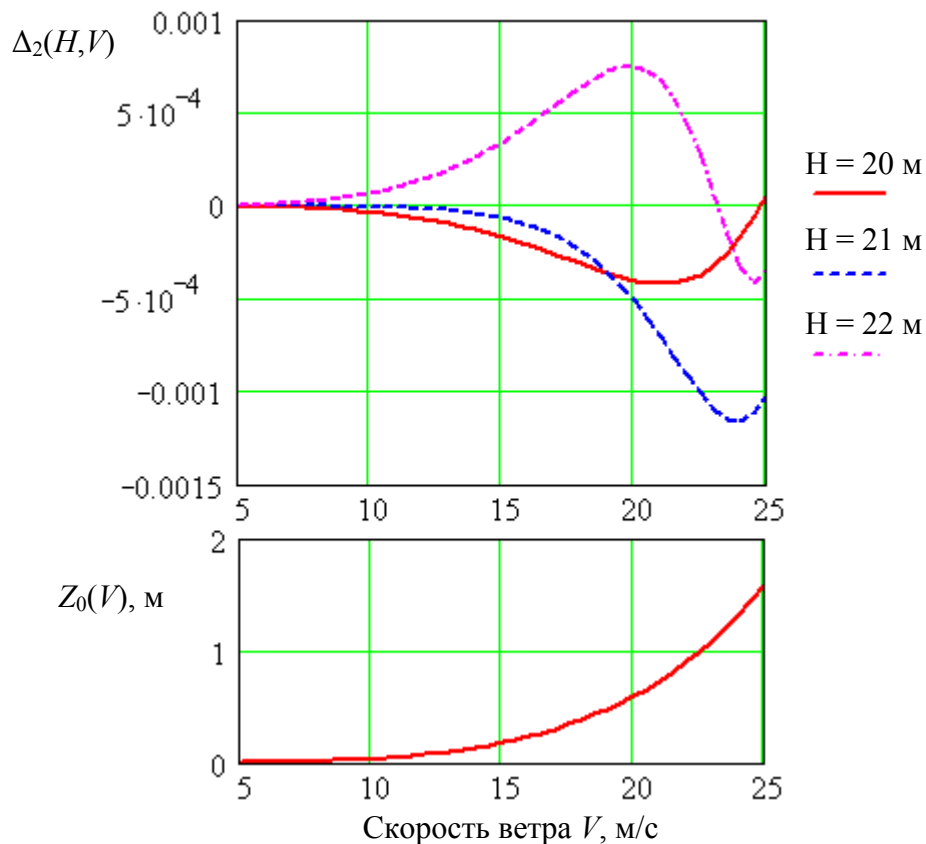


Рис. 8. Зависимости относительного приращения сигналов РВСО от скорости ветра

Чтобы иметь представление о величине помехи, нужно знать, что относительные приращения полезного сигнала при пересечении человеком-нарушителем рубежа охраны, формируемого РВСО [2, 3], при используемых выше исходных данных составляют единицы процентов. Таким образом, при реальных скоростях ветра помеха РВСО от раскачивающихся крон деревьев в метровом диапазоне рабочих частот на порядок ниже полезного сигнала человека-нарушителя. Следует также учесть, что при мокрой земле сигнал от человека также увеличивается по сравнению с сигналом при сухой земле, как и помеха от колебания деревьев.

4. Влияние движения крон деревьев на РВСО у кромки леса

При расположении РВСО вне лесного массива на расстоянии R от него продольную составляющую поля на отражающей поверхности найдем из того же выражения (8), что и в случае расположения РВСО внутри лесного массива:

$$E_{xf1} = E_{x1} (R_0/2, R, H + R_c).$$

Здесь поле определяется в середине отражающей поверхности, образуемой кронами деревьев, и по средней линии расстояния между ПРД и ПРМ.

Аналогично предыдущему случаю напряженность поля на приемной антенне будет равна

$$E_{xr1}(x) = E_{x1}(R_0/2, R, H + R_c) \frac{R^2}{R_3^2(R_0)} \rho_c e^{-ik_1 R_3(x)},$$

где множитель с дробью выражает $\cos^2 \theta$;

$$R_3(x) = \sqrt{(x - R_0/2)^2 + R^2 + (H + R_c)^2} -$$

расстояние от середины отражающей поверхности до точки x на фиктивной приемной антенне;

$$R_3(R_0) = R_3(x = R_0).$$

Напряжение приемной антенны находим интегрированием поля по длине антенны с учетом прохождения волной расстояния d_a в земле:

$$U_{r1} = e^{-ik_2 d_a} \left[\int_{-L}^0 \frac{\sin k_2(L+x)}{\sin k_2 L} E_{xr1}(R_0+x) dx + \int_0^L \frac{\sin k_2(L-x)}{\sin k_2 L} E_{xr1}(R_0+x) dx \right]. \quad (11)$$

Суммарный сигнал ПРМ складывается из прямого сигнала (7) и отраженного от крон деревьев сигнала (11):

$$U_{g1} = U_d + U_{r1}.$$

Как и в предыдущем случае, суммарный сигнал в зависимости от высоты крон имеет интерференционные колебания, как показано на рис. 9, где показана также огибающая этих колебаний.

В данном случае, в отличие от предыдущего, приращения сигналов РВСО обусловлены не вертикальными, а горизонтальными отклонениями массива крон X_0 . И, несмотря на то, что горизонтальные отклонения гораздо больше вертикальных, не они определяют величину приращения сигналов, как говорилось выше, а коэффициент отражения электромагнитной волны от диффузной поверхности, образуемой массивом крон.

На рис. 10 приведены графики относительных приращений сигнала от действия ветра $\Delta_3 = |U_{r1}|/|U_d|$ при различных высотах крон H и расстояниях R в условиях мокрой земли, когда эти приращения максимальны.

Графики показывают наличие расстояний, на которых при данной высоте крон влияние максимально. При малых расстояниях влияние крон мало за счет большого угла падения, при больших расстояниях – за счет этих больших расстояний.

Все же максимальные приращения сигнала, показанные на рис. 10, меньше соответствующих приращений при расположении РВСО внутри лесного массива (см. рис. 7,б) за счет бóльших расстояний и углов падения.

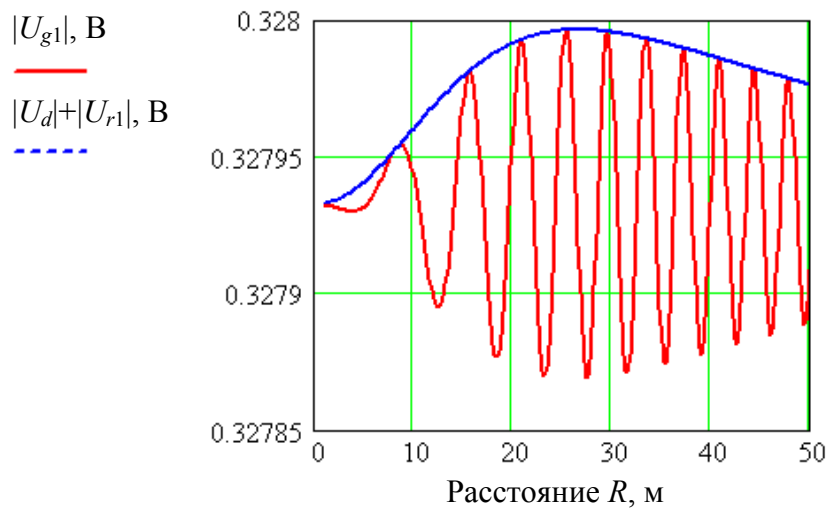


Рис. 9. Зависимости максимального абсолютного приращения сигнала РВСО от расстояния до лесного массива

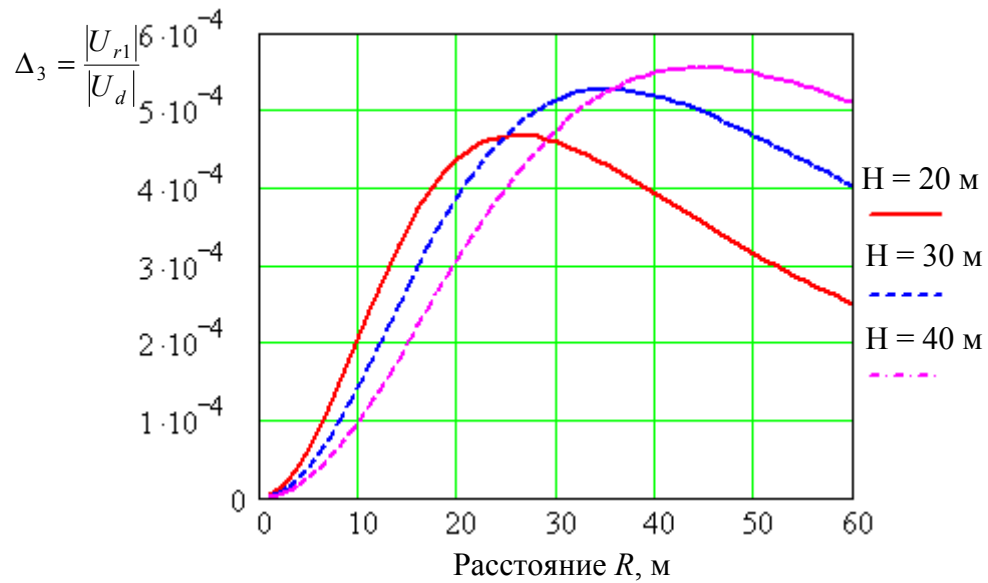


Рис. 10. Зависимости максимальных относительных приращений сигналов РВСО от расстояния до лесного массива

Заключение

При использовании РВСО для охраны рубежей в условиях лесистой местности возможно влияние на него крон деревьев, отклоняющихся при воздействии ветра. Отклонение некоторого массива крон вызывает изменение

отраженного от него сигнала, принимаемого ПРМ РВСО, соответствующее появлению помехи. Отклонение кроны дерева при ветре определено путем моделирования ствола дерева консольной конусной балкой с фиксированным нижним концом и приложением силы действия ветра к верхнему концу.

Суммарный сигнал РВСО образуется при интерференции прямого сигнала и сигнала, отраженного от массива крон. При воздействии ветра отклонения массива крон могут достигать нескольких метров и суммарный сигнал может переходить из интерференционного максимума в минимум и обратно. А величина интерференционных экстремумов определяется отражающей способностью массива крон, зависящей от его плотности и угла падения электромагнитной волны на отражающую поверхность. Моделирование приращений сигнала на частотах ниже 100 МГц при отклонениях массива крон деревьев, представляющих собой помеху РВСО в лесу, показало, что эта помеха на порядок ниже сигнала от человека-нарушителя и практически не мешает его обнаружению.

Библиографический список

1. **Токарев, Н. Н.** Радиоволновые средства обнаружения для работы в растительности / Н. Н. Токарев, И. Ю. Соломатин // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 6–8 октября 2010 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – С. 197–204.
2. **Токарев, Н. Н.** Радиоволновое средство обнаружения, скрытно устанавливаемое под землей, для комплекса «БСК» / Н. Н. Токарев, И. Ю. Соломатин, В. П. Гнусарев // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 18–20 сентября 2012 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – С. 132–139.
3. **Токарев, Н. Н.** Скрытное радиоволновое средство обнаружения «Рапс-М2» / Н. Н. Токарев, В. П. Гнусарев // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : сб. науч. ст. X Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 7–9 октября 2014 г.) / под ред. А. Д. Гулякова, В. И. Волчихина, В. А. Первунинских. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 211–217.
4. **Молчанов, А. А.** Лес и окружающая среда / А. А. Молчанов. – Москва : Наука, 1968. – 248 с.
5. **Никитин, Н. Н.** Курс теоретической механики : учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов / Н. Н. Никитин. – Москва : Высш. шк., 1990. – 607 с.
6. **Нецветов, М. В.** Вибрации в лесу под действием ветра (теоретический аспект оценки частот) / М. В. Нецветов // Экология та ноосферология. – 2003. – Т. 13, № 1-2. – С. 87–92.
7. **Симиу, Э.** Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан ; пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецовоной ; под ред. Б. Е. Маслова. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с.
8. **Колесников, А. И.** Декоративная дендрология / А. И. Колесников. – Москва : Лесная промышленность, 1974. – 704 с.
9. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика : учеб. пособие : в 10 т. Т. I. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. – Москва : Наука, 1988. – 216 с.
10. **Лавров, Г. А.** Приземные и подземные антенны / Г. А. Лавров, А. С. Князев. – Москва : Сов. радио, 1965. – 472 с.

11. **Оленин, Ю. А.** Анализ поля в линии передачи проводно-волнового средства обнаружения / Ю. А. Оленин, Н. Н. Токарев // Новые промышленные технологии. – 1999. – Вып. 4–5 (291–292). – С. 49–61.
12. **Токарев, Н. Н.** Моделирование прямого сигнала радиоволновых средств обнаружения с подземными антеннами / Н. Н. Токарев // Радиотехника. – 2013. – № 2. – С. 98–102.
13. Радиотехнические системы : учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, Ю. Д. Ульяницкий. – Москва : Высш. шк., 1990. – 496 с.
14. **Бурмистрова, О. Н.** Строение дерева и древесины : метод. указания / О. Н. Бурмистрова. – Ухта : УГТУ, 2007. – 50 с.
15. Организация тактической маскировки войск гражданской обороны. – URL: <http://studydoc.ru/doc/491291/glava-7---organizaciya-takticheskoy-maskirovki-vojsk-grazhdanskoj-oborony.html>. (дата обращения: 03.10.2018)

References

1. Tokarev N. N., Solomatin I. Yu. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: materialy VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza – Zarechnyy, 6–8 oktyabrya 2010 g.)* [Modern security technologies and means of complex facility security provision: proceedings of VIII All-Russian scientific and practical conference (Russia, Penza – Zarechniy, October 6th-8th, 2010)]. Penza: Izd-vo PGU, 2010, pp. 197–204. [In Russian]
2. Tokarev N. N., Solomatin I. Yu., Gnusarev V. P. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza – Zarechnyy, 18–20 sentyabrya 2012 g.)* [Modern security technologies and means of complex facility security provision: proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference (Russia, Penza – Zarechniy, September 18th-20th, 2012)]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, pp. 132–139. [In Russian]
3. Tokarev N. N., Gnusarev V. P. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: sb. nauch. st. X Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza – Zarechnyy, 7–9 oktyabrya 2014 g.)* [Modern security technologies and means of complex facility security provision: proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference (Russia, Penza – Zarechniy, September 18th-20th, 2012)]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 211–217. [In Russian]
4. Molchanov A. A. *Les i okruzhayushchaya sreda* [The forest and the environment]. Moscow: Nauka, 1968, 248 p. [In Russian]
5. Nikitin N. N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki: ucheb. dlya mashinostroit. i priborostroet. spets. vuzov* [A course of theoretical mechanics: textbook for machine building and instrument engineering majors at universities]. Moscow: Vyssh. shk., 1990, 607 p. [In Russian]
6. Netsvetov M. V. *Ekologiya ta noosferologiya* [Ecology and noosphere studies]. 2003, vol. 13, no. 1-2, pp. 87–92. [In Russian]
7. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Wind impact on buildings and constructions]; transl. from Engl. by B. E. Maslov, A. V. Shvetsova. Moscow: Stroyizdat, 1984, 360 p. [In Russian]
8. Kolesnikov A. I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Decorative dendrology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1974, 704 p. [In Russian]
9. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie: v 10 t. T. I. Mekhanika* [Theoretical physics: teaching aid: in 10 volumes. Vol. 1. Mechanics]. 4th ed., corr. Moscow: Nauka, 1988, 216 p. [In Russian].
10. Lavrov G. A., Knyazev A. S. *Prizemnye i podzemnye anteny* [Surface and underground antennas]. Moscow: Sov. radio, 1965, 472 p. [In Russian]

11. Olenin Yu. A., Tokarev N. N. *Novye promyshlennyye tekhnologii* [New industrial technologies]. 1999, iss. 4–5 (291–292), pp. 49–61. [In Russian]
12. Tokarev N. N. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2013, no. 2, pp. 98–102. [In Russian]
13. Grishin Yu. P., Ipatov V. P., Kazarinov Yu. M., Kolomenskiy Yu. A., Ul'yanitskiy Yu. D. *Radiotekhnicheskie sistemy: ucheb. dlya vuzov po spets. «Radiotekhnika»* [Radio engineering systems: university textbook for “Radio engineering” specialty]. Moscow: Vyssh. shk., 1990, 496 p. [In Russian]
14. Burmistrova O. N. *Stroenie dereva i drevesiny: metod. ukazaniya* [Tree and wood structure: instructional guidelines]. Ukhta: UGTU, 2007, 50 p. [In Russian]
15. *Organizatsiya takticheskoy maskirovki voysk grazhdanskoy oborony* [Organization of tactical camouflage for civil defence troops]. Available at: <http://studydoc.ru/doc/491291/glava-7---organizatsiya-takticheskoy-maskirovki-voysk-grazhdanskoy-oborony.html>. (accessed Oct. 03, 2018) [In Russian]

Токарев Николай Николаевич

кандидат технических наук, главный специалист по радиотехническим средствам обнаружения, подразделение № 134, Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники – филиал АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» (Россия, г. Заречный Пензенской области, пр. Мира, 1, корп. 1)

E-mail: ntk4@nikiret.ru

Tokarev Nikolay Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, chief specialist in radio-wave detectors, division №134, Research and Design Institute of Radio-Electronic Engineering – branch of JSC “FSPC “PC “Start” named after M. V. Protsenko” (building 1, 1 Mira avenue, Zarechny, Penza region, Russia)

Образец цитирования:

Токарев, Н. Н. Помехи радиоволновому средству обнаружения нарушителя в лесу / Н. Н. Токарев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 69–87. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-2-7.