

УДК 537.876.4(06)

А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко, Г.В. Рыбалка, О.А. Хмелевская

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПАССИВНОЙ ЗАЩИТОЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ РАДИОИЗОТОПНЫХ ПОКРЫТИЙ

Приведены результаты дальнейшего развития модели определения излучательных свойств наземных объектов. Разработаны методики оценки излучательных свойств наземных объектов с пассивной защитой на основе композитных радиоизотопных покрытий. Получены численные оценки радиояркостной температуры наземных объектов на типовых фонах с учетом использования композитного радиоизотопного покрытия для снижения их радиолокационной заметности.

**Ключевые слова:** композитные радиоизотопные покрытия, пассивная защита, излучательные свойства.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

Проведенный анализ последних исследований и публикаций показал, что в последнее время вопросам исследования излучательных свойств различных объектов уделяется повышенное внимание [1 – 3].

Важность задачи получения достоверной и подробной информации о различных объектах и средах, с помощью всевозможных разведывательных радиотехнических систем, в частности радиометрических систем самонаведения (РМ ССН), обуславливает необходимость дальнейшего исследования их излучательных свойств. При этом особый интерес представляют оценки радиояркостной температуры наземных объектов на типовых фонах, с учетом использования композитного радиоизотопного покрытия, для снижения их радиолокационной заметности.

Исходя из условий обнаружения объектов с малыми радиояркостными контрастами должны быть учтены все факторы, приводящие к изменениям радиотепловых сигналов на трассе их распространения, а также и излучательных способностей объектов и фонов, на которых они размещены. Кроме того, должен быть учтен вклад в формирование антенной радиояркостной температуры радиометрических систем кажущейся температуры объектов, определяемой различными участками поверхности объекта защиты и радиояркостной температурой излучения атмосферы с учетом геометрии визирования. Такой подход предопределяет необходимость уточнения расчетной модели определения радиояркостных антенных температур, формируемых радиометрическими системами, и на ее основе методики оценки контрастообразующих температур.

**Цель статьи.** Оценить излучательные свойства наземных объектов с пассивной защитой на основе композитных радиоизотопных покрытий для снижения их радиолокационной заметности.

### Основная часть

В соответствии с номенклатурой объектов, к их типовым фонам могут быть отнесены следующие фоны: асфальт, бетон, песок, трава, гравий, глинистая пашня.

Поскольку рабочими длинами волн радиометрических систем самонаведения являются длины волн  $\lambda=3,2$  мм и  $\lambda=8,6$  мм, соответствующие окнам прозрачности в миллиметровом диапазоне волн (ММ ДВ), которые расположены между оптическим и радиодиапазоном, то определение излучательной способности типовых фонов будем осуществлять на основе методов, используемых в радиотехнике и оптике. К таким методам относятся метод малых возмущений и метод касательной плоскости [5, 8]. Учитывая, что типовые фоны статистически неоднородны (обладающие разной степенью шероховатости), то при определении их излучательных свойств будем использовать электродинамические модели [5, 9]

Основываясь на основных соотношениях теории теплового излучения [9] и модели процесса формирования радиояркостной температуры объекта визирования РМ ССН [10], модель определения радиояркостных температур типовых фонов и объектов представим в виде:

$$T_{\text{я}} = T_0 \chi_i \left( P, \theta, \varphi, \varepsilon_i, \sigma_{\xi_i}, \lambda, B, \Phi \right) = \\ = T_0 \left[ 1 - \left[ F_i \left( P, \theta, \varphi, \varepsilon_i, \sigma_{\xi_i}, \lambda, B, \Phi \right) \right]^2 + \right. \\ \left. + T_0 \sum_{i=1}^n \delta \chi_i(B) + T_0 \sum_{i=1}^n \delta \chi_i(\Phi) \right]$$

где  $F_i \left( P, \theta, \varphi, \varepsilon_i, \sigma_{\xi_i}, \lambda, B, \Phi \right)$  – обобщенный параметр, описывающий коэффициенты отражения и рассеяния  $i$ -го покрова (объекта) в зависимости от параметра Релея –  $P$ , которые в свою очередь зависят от изменения угла визирования  $(\theta, \varphi)$ , комплексной диэлектрической проницаемости

( $\dot{\epsilon}_i$ ), высоты неровностей ( $\sigma_{\xi_i}$ ), длины волны ( $\lambda$ ) и вида поляризации ( $\rho$ );  $\sum \delta\chi_i(B)$  – вариации излучательных способностей покровов, обусловленные влиянием погодно-климатических факторов  $B$ ;  $\sum \delta\chi_i(\Phi)$  – вариации излучательных способностей объектов, обусловленные влиянием объемной формы объекта  $\Phi$ .

Оценку влияния излучательной способности типовых фонов на формирование их кажущихся радиоярких температур проведем со следующими допущениями [11].

Типовые покровы, в зависимости от длины волны, будем рассматривать как такие, что обладают свойствами гладких ( $\sigma_{\xi_i} \approx 0$ ), квазигладких  $P < 1$  и хаотически неровных поверхностей  $P > 1$ , где  $P$  – параметр Релея  $P = 2k\sigma_{\xi_i} \cos \theta$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ .

Для излучающей среды, отделенной от свободно-пространства плоской границей раздела ( $\sigma_{\xi_i} \approx 0$ ), будем использовать коэффициенты отражения по напряженности поля для горизонтальной ( $V_{gi}$ ) и вертикальной ( $V_{vi}$ ) поляризации, которые описываются известными формулами Френеля и содержат относительную комплексную диэлектрическую проницаемость и угол визирования  $\theta$ . В случае хаотически неровной поверхности для квазигладких поверхностей излучательную способность оценим в приближении метода малых возмущений или метода касательной плоскости в случае, когда высота неровностей во много раз превосходит длину волны [4, 9].

Для излучающей среды с гладкой границей раздела ( $\sigma_{\xi_i} \approx 0$ ), параметр  $F_i P, \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}$  при вертикальной и горизонтальной составляющих поляризации радиотеплового излучения можно описать выражениями через коэффициенты отражения Френеля [6]

$$F_{ig} P, \theta, \dot{\epsilon}_i = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta + j\epsilon_i''}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta + j\epsilon_i''}}; \quad (1)$$

$$F_{vi} P, \theta, \dot{\epsilon}_i = \frac{\epsilon_i + j\epsilon_i'' \cos \theta - \sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta + j\epsilon_i''}}{\epsilon_i + j\epsilon_i'' \cos \theta + \sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta + j\epsilon_i''}}. \quad (2)$$

Для покровов с  $\sigma_{\xi_i} \neq 0$  и  $P < 1$  в соответствии с методом возмущений запишем:

$$F_{gi} P, \theta, \dot{\epsilon}_i = \frac{\eta_{\xi i} - \sin \theta}{\eta_{\xi i} + \sin \theta}; \quad (3)$$

$$F_{vi} P, \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i} = \frac{\cos \theta - \eta_{\xi i}}{\cos \theta - \eta_{\xi i}}, \quad (4)$$

где  $\eta_{\xi i}$  – эффективный импеданс  $i$ -го покрова.

Согласно [12]  $\eta_{\xi i}$  описывается выражением

$$\eta_{\xi i} = \eta_{0i} + k^2 \sigma_{\xi_i}^2 \cos \theta \cos^2 \theta - \eta_{0i}^2, \quad (5)$$

где  $\eta_{0i} = 1/\sqrt{\dot{\epsilon}_i}$ .

Для покровов с параметром Релея  $P > 1$  согласно метода касательной плоскости параметр  $F_i P, \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}$  приближенно описывается с использованием плоского альbedo – коэффициента рассеяния хаотической поверхностью энергии радиотеплового излучения в полусферу с телесным углом  $2\pi$  [7].

Учитывая, что наведение управляемых средств поражения (УСП) с РМ ССН на наземные объекты происходит с небольших высот [3], что соответствует небольшой зоне визирования, то для учета характеристик высот неровностей будем использовать нормальный закон распределения.

В [4] показано, что при нормальном законе распределения высот неровностей, с учетом  $P > 1$ , параметр  $F_{ivg} \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}, P$  описывается выражением

$$F_{ivg} \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}, P = \left| V_{vg} \theta, \dot{\epsilon}_i V_{si} \theta, \sigma_{\xi_i} \right|, \quad (6)$$

где  $V_{si} = \exp -2k^2 \sigma_{\xi_i}^2 \cos^2 \theta$  – множитель, учитывающий частичное разрушение зеркального отражения под влиянием неровностей. Таким образом, выражения для определения зависимости радиояркой температуры  $i$ -го покрова от угла визирования, среднеквадратического отклонения высот неровностей  $\sigma_{\xi_i}$ , комплексной диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}_i$  и длины волны  $\lambda$  для вертикальной  $T_{\gamma}^B$  и горизонтальной  $T_{\gamma}^{\Gamma}$  составляющих поляризации радиотеплового излучения, соответственно, будут иметь вид [11]

$$T_{\gamma}^B = T_0 \chi_{vi} \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}, P = T_0 \left\{ 1 - \left[ \begin{array}{l} V_{vi}^2 \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i} \approx 0, P \neq 0 \\ \left( \frac{\cos \theta - \eta_{\xi i}}{\cos \theta - \eta_{\xi i}} \right)^2, P < 1, \sigma_{\xi_i} \neq 0 \\ V_{vg} \theta, \dot{\epsilon}_i V_{si} \theta, \sigma_{\xi_i}^2, P > 1, \sigma_{\xi_i} \neq 0 \end{array} \right] \right\} + T_0 \sum_{i=1}^n \delta\chi_{vi}(B) + T_0 \sum_{i=1}^n \delta\chi_{vi}(\Phi) \quad (7)$$

$$T_{\gamma}^{\Gamma} = T_0 \chi_{gi} \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}, P = T_0 \left\{ 1 - \left[ \begin{array}{l} V_{gi}^2 \theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i} \approx 0, P_i \neq 0 \\ \left( \frac{\eta_{\xi i} - \sin \theta}{\eta_{\xi i} - \sin \theta} \right)^2, P_i < 1, \sigma_{\xi_i} \neq 0 \\ V_{gi} \theta, \dot{\epsilon}_i V_{si} \theta, \sigma_{\xi_i}^2, P_i > 1, \sigma_{\xi_i} \neq 0 \end{array} \right] \right\} + T_0 \sum_{i=1}^n \delta\chi_{vi}(B) + T_0 \sum_{i=1}^n \delta\chi_{vi}(\Phi) \quad (8)$$

В соответствии с выражениями (7) – (8), а также значениями диэлектрической проницаемости и среднеквадратических значений высот неровностей типовых покровов на длинах волн 8,6 мм и 3,2 мм, приведённых в [6], построены графики зависимости кажущейся радиояркой температуры типовых фонов от угла визирования  $\theta$  при вертикальной (рис. 1, 2) и горизонтальной поляризации радиотеплового излучения (рис. 3, 4). Расчеты выполнены без учета вариаций  $\delta\chi_i$  В и  $\delta\chi_i$  Ф .

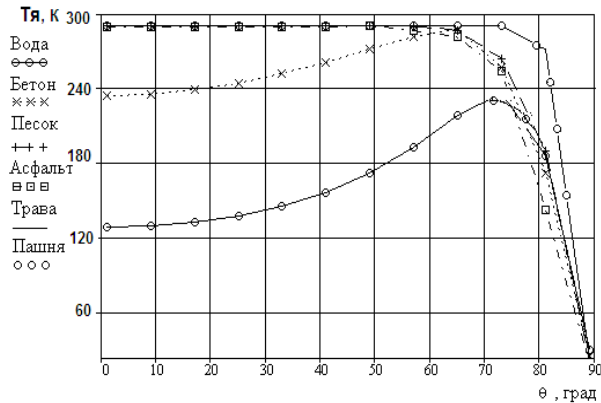


Рис. 1. Зависимость излучательной способности типовых фонов от угла визирования для вертикальной поляризации ( $\lambda = 3,2$  мм)

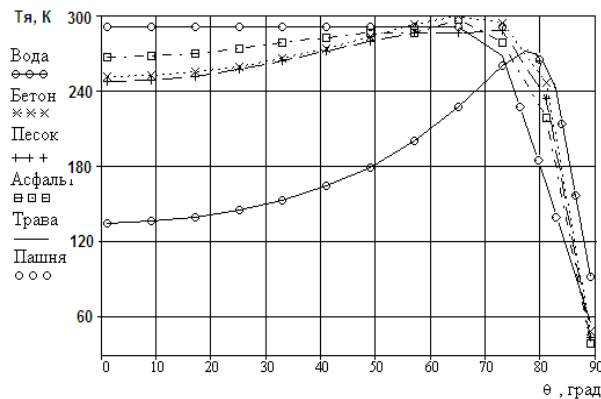


Рис. 2. Зависимость излучательной способности типовых покровов от угла визирования для вертикальной поляризации ( $\lambda = 8,6$  мм)

Поскольку радиотепловое излучение является неполяризованным [9] или частично поляризованным, а согласно результатам расчета вертикально поляризованная составляющая радиотеплового излучения типовых фонов при отклонении угла визирования от нормали возрастает и принимает максимальное значение в диапазоне углов  $\theta = 65^\circ \dots 80^\circ$  (углы Брюстера), то, основываясь на минимаксном принципе выбора оценок, в предположении, что приемник РМ ССН настроен на максимальный уровень сигнала информационного параметра для оценки радиоярких температур типовых фонов будем использовать значения  $T_{\text{я}}$  для вертикально поляризованных составляющих радиотеплового излучения.

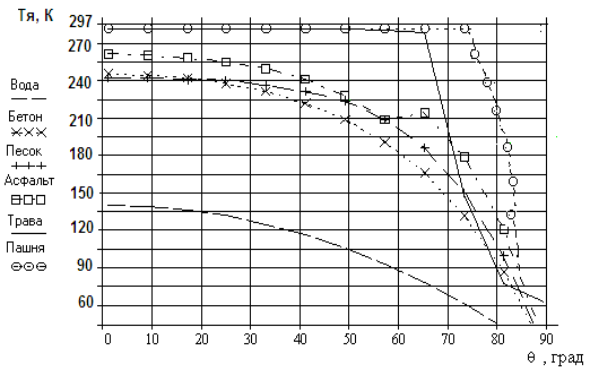


Рис. 3. Зависимость излучательной способности типовых покровов от угла визирования для горизонтальной поляризации ( $\lambda = 8,6$  мм)

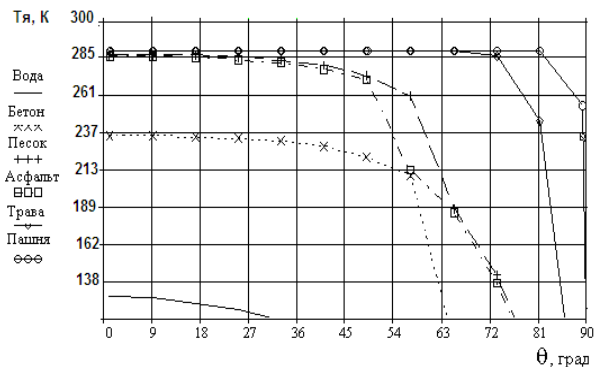


Рис. 4. Зависимость излучательной способности типовых покровов от угла визирования для горизонтальной поляризации ( $\lambda = 3,2$  мм)

Анализ полученных зависимостей кажущихся радиоярких температур типовых фонов показывает, что в диапазоне реальных углов визирования РМ ССН их значения составляют величины порядка 237 – 291 К, т.е. контрастообразующая температура металлических объектов, к которым может быть отнесено большая часть подвижной наземной техники, будет определяться такими же значениями радиоярких температур.

Оценка кажущейся радиояркой температуры с учетом формы объекта.

Учитывая, что отдельные части поверхности трехмерных объектов сложной формы радиометрической системой не разрешаются, их кажущуюся температуру можно описать выражением

$$T_{\text{я об эф}} = \frac{T_0 \sum_i \chi_i S_{i \chi} + T_{\text{атм}} \sum_j k_j S_{j k}}{S_{\text{об}}}, \quad (9)$$

где  $T_0$  – термодинамическая температура;  $\chi_i$  – излучательная способность КРП;  $S_{i \chi}$  – площадь видимых закрытых КРП участков поверхности объекта;  $T_{\text{атм}}$  – радиояркая температура атмосферы;  $k_j$  – коэффициент отражения незакрытых участков поверхности объекта;  $S_{j k}$  – площадь видимых незакрытых участков поверхности объекта;

$$S_{об} = \sum_{i=1}^n S_i \chi_i + \sum_{j=1}^m S_j \chi_j$$

– площадь видимой части поверхности объекта.

Для расчета радиояростной температуры объекта, определяемой радиояростной температурой атмосферного излучения  $T_{атм}$ , необходимо знание диаграммы рассеяния объекта в направлении линии визирования РМ ССН, что на практике вызывает определенные трудности. Поэтому для расчета радиояростной температуры объекта предлагается использовать известную упрощенную модель изотропного рассеяния плоского зеркала, используемую в оптике [4].

Рассмотрим влияние формы металлических объектов на их кажущуюся радиояростную температуру. Металлические объекты сложной формы с учетом элементов, вносящих основной вклад в формирование их радиояростных температур, можно представить композицией из тел простой формы.

Учитывая, что металлический объект является идеальным отражателем, то его кажущаяся радиояростная температура определяется радиояростной температурой подсвечивающего излучения атмосферы и зависит от углов визирования РМ ССН. При этом в соответствии с [3] будем полагать, что на длинах волн  $\lambda=8,6$  мм и  $\lambda = 3,2$  мм плоские металлические поверхности являются ламбертовыми. То есть для определения радиояростной температуры металлического объекта можно использовать известную в оптике модель ламбертова рассеяния [13], с помощью которой можно представить  $T_{яоб}$ , как усредненную по телесному углу  $4\pi$  радиояростную температуру излучения атмосферы.

Будем полагать, что в диапазоне зенитных углов  $\theta \approx 0 \dots 80^\circ$  излучающая атмосфера горизонтально однородна. При этом для получения расчетных данных следует учитывать временные вариации значений атмосферного фона в ММ ДВ.

Пусть плоский элементарный отражатель расположен в центре пространственной прямоугольной системы координат  $0, x, y, z$ , как это показано на рис. 5. Ориентация элементарного отражателя задана азимутальным  $\phi$  и зенитным  $C$  углами его нормали  $P$ . Антенна радиометрического приемника находится в точке  $A$  в плоскости  $xOz$  и ориентирована под углом визирования  $\theta$ .

Радиотепловое излучение атмосферы, падающее под зенитным углом  $\beta$  с направления  $OB$ , отражается в направлении  $OA$  под углом  $\alpha$ . Зенитный угол излучения атмосферы  $\beta$ , углы падения и отражения  $\alpha$ , угол ориентации отражающей площадки  $C$  и  $\phi$  и угол визирования РМ ССН связаны выражениями [14]

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \cos \phi \sin C \sin \theta + \cos \theta \cos C, \\ \cos \beta &= 2 \cos \alpha \cos C - \cos \theta \end{aligned} \quad (10)$$

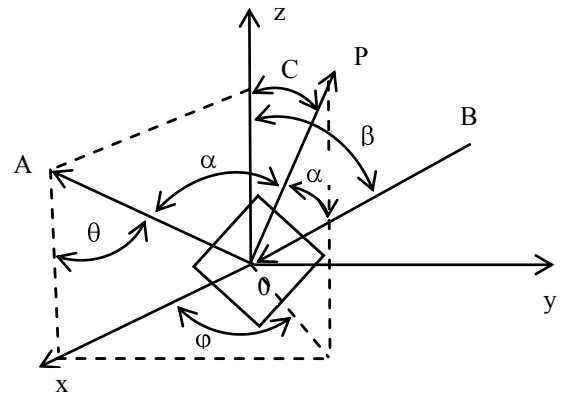


Рис. 5. Излучение атмосферы с направления  $OB$ , отраженное элементарной плоской поверхностью с нормалью  $OP$  в сторону приемника РМ ССН

Анализ этих соотношений показывает, что у горизонтально ориентированной плоской металлической поверхности  $T_{я} = T_{яа} \theta$ , вертикально ориентированный плоский отражатель независимо от азимутального угла  $\phi$  в направлении РМ ССН не отражает. Таким образом, можно определить радиояростные температуры металлических тел разной конфигурации, разбив их на элементарные отражатели.

Рассмотрим задачу определения радиояростной температуры танка, представленного упрощенно в форме двух параллелепипедов.

При наблюдении объектов, у которых их телесный угол много больше поля зрения антенны РМ ССН в главном лепестке ее диаграммы направленности (ДН), эффективная температура объекта, усредненная по всей поверхности, определяется выражением (9), которое с учетом вариаций излучательных способностей элементарных площадок поверхности имеет вид

$$T_{я\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \chi_i + \delta\chi_i T_0 S_{Bi} + \sum_{j=1}^m k_j T_{яатм} + \delta T_{яатм} S_{Bj}}{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} S_{Bi} + S_{Bj}}$$

В соответствии с полученным выражением суммирование производится по всем  $i$ -м видимым площадкам поверхности объекта  $S_{Bi}$ , закрытым средствами пассивной защиты с эффективными радиояростными температурами  $T_{я\phi i} = \chi_i + \delta\chi_i T_0$  и по всем видимым  $j$ -м элементарным площадкам  $S_{Bj}$  его "незакрытой" поверхности с эффективной радиояростной температурой, определяемой радиояростной температурой атмосферы  $T_{яатм}$  с учетом ее вариаций  $\delta T_{яатм}$

Площадь видимой части поверхности будет определяться в соответствии с выражением [14]

$$S_{Bi} = \sum_{i=1}^{n=3} S_i \cos \theta_i, \quad (11)$$

где  $S_1 = S_4 = ab$ ,  $S_2 = S_5 = ac$ ,  $S_3 = S_6 = bc$ .

Исследования, проведенные в [14] показали, что эффективная радиояркая температура параллелепипеда, определяемая эффективной радиояркой температурой  $T_{эф i}$  его видимых плоскостей, описывается выражением:

$$T_{эф}^{пр} = \frac{T_{эф1}S_1 \cos \theta + T_{эф2}S_2 \cos \varphi \sin \theta}{S_1 \cos \theta + S_2 \cos \varphi \sin \theta + S_3 \sin \varphi \cos \theta} + \frac{T_{эф3}S_3 \sin \varphi \cos \theta}{S_1 \cos \theta + S_2 \cos \varphi \sin \theta + S_3 \sin \varphi \cos \theta} \quad (12)$$

Рассмотрим зависимость  $T_{эф}$  танка от угла визирования РМ ССН при ее функционировании на этапе обнаружения объектов. При этом будем считать, что размеры танка полностью заполняют элемент разрешения антенной системы, т.е. коэффициент заполнения главного лепестка луча ДНА равен единице.

В соответствии с выражением (12) эффективная радиояркая температура танка будет определяться выражением:

$$T_{эф.танка} = \frac{T_1 S_1 - S'_1 - S'_3 \sin \varphi \cos \theta - S_2 \cos \varphi \sin \theta}{S_1 \cos \theta + S_2 \cos \varphi \sin \theta + S_3 \cos \theta \sin \varphi} + \frac{T_2 S_2 + T'_2 S'_2 \cos \varphi \sin \theta}{S_1 \cos \theta + S_2 \cos \varphi \sin \theta + S_3 \cos \theta \sin \varphi} + \frac{T_3 S_3 + T'_3 S'_3 \cos \theta \sin \varphi}{S_1 \cos \theta + S_2 \cos \varphi \sin \theta + S_3 \cos \theta \sin \varphi} + \frac{T'_1 S'_1 \cos \theta}{S_1 \cos \theta + S_2 \cos \varphi \sin \theta + S_3 \cos \theta \sin \varphi}$$

Аналогично можно определить эффективную радиояркую температуру танка, представленного в виде параллелепипеда, сторона каждого из которых попадает в основной лепесток ДНА РМ ССН с коэффициентом заполнения равным единице.

Значения углов визирования, выраженные через высоту визирования ССН –  $H_1$ , и высоту (ширину) площадки визирования  $H_2$  приближенно можно определить в соответствии с выражениями

$$\theta_2 = \arg \operatorname{ctg} \left( \frac{H_1 - H_2}{R' + H_2 / 2} \right); \quad \theta_3 = \arg \operatorname{ctg} \left( \frac{H_1 - 1,5H_2}{R' + H_2} \right);$$

$$\theta_4 = \arg \operatorname{ctg} \left( \frac{H_1 - 2H_2}{R' + 1,5H_2} \right),$$

где  $R' \approx H_1 - H_2 / 2 \operatorname{tg} \theta_1$ .

Выражение для контраста радиояркой температуры параллелепипеда с учетом (10) будет иметь вид

$$\Delta T_{Я}^{пр} = \Delta T_{Ягорпл.} / (1 + c \cos \varphi / b + \sin \varphi / a \operatorname{tg} \theta), \quad (13)$$

где  $\Delta T_{Ягорпл.}$  – радиояркий контраст горизонтальной плоскости, определяемый радиояркой температурой падающего излучения атмосферы и радиояркой температурой фона.

График зависимости радиояркого контраста танка на бетоне от угла визирования  $\theta$  и азимутального угла  $\varphi$ , представленного в форме параллелепипеда со сторонами:  $a=4$  м,  $b=9$  м,  $c=1$  м на  $\lambda=3,2$  мм и  $\lambda=8,6$  мм при коэффициенте заполнения луча равного единице, приведен на рис. 6.

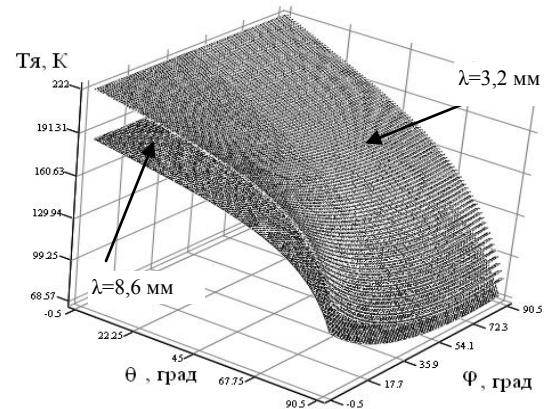


Рис. 6. Зависимость радиояркого контраста модели танка на бетоне от угла визирования  $\theta$  и азимутального угла  $\varphi$  на  $\lambda=3,2$  мм,  $\lambda=8,6$  мм

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, показывает, что в диапазоне углов визирования  $\theta = 0^\circ \dots 60^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ \dots 90^\circ$  радиояркий контраст танка, представленного в форме параллелепипеда со сторонами 4 м, 9 м, 1 м. на длине волны  $\lambda=3,2$  мм монотонно убывает с 222 К до 100 К, а на  $\lambda=8,6$  мм с 191 К до 70 К. Результаты расчета зависимости вероятности обнаружения танка РМ ССН от радиояркого контраста объект-фон  $\Delta T_{оф}$  и времени интегрирования, приведены на рис. 7.

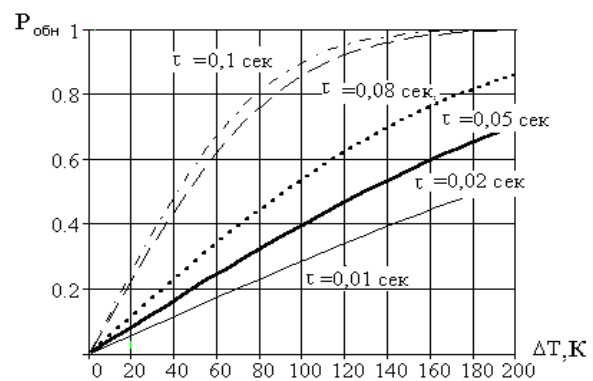


Рис. 7. Зависимость вероятности обнаружения модели танка РМ приемником ССН от радиояркого контраста

Видно, что при уменьшении контраста антенных температур РМ ССН до значений 20...60 К при максимально возможном времени интегрирования, определяемом высотой и скоростью полета ССН, вероятность обнаружения объекта уменьшается до значений 0,2...0,4. При этом уменьшается и дальность обнаружения объекта РМ ССН, определяемая в соответствии с выражением

$$L_M = \sqrt{0,04S_0 G \eta_{\text{АФУ}} \eta_g \sqrt{\Delta f \Delta \tau} \cdot \frac{K L \chi_1 - \chi_2 T_0 - T_{\text{ЯН}}}{T_n}}, \quad (14)$$

где  $K(L) = \exp -0,23\gamma L = -0,23\gamma H \sec \theta$  – коэффициент, учитывающий ослабление в атмосфере  $\gamma$ , с учетом высоты наблюдения  $H$  и угла визирования  $\theta$ ;  $T_0$  – термодинамическая температура;  $T_{\text{ЯН}}$  – яркостная температура неба;  $T_n$  – эквивалентная температура теплового шума усилительно- преобразовательного тракта радиометра;  $\chi_1, \chi_2$  – излучательные способности объекта визирования и фона;  $S_0$  – площадь объекта;  $G$  – КНД антенны;  $\eta_{\text{АФУ}}$  – КПД антенно-фидерного тракта;  $q = \eta_g \sqrt{\Delta f \Delta \tau}$  – отношение сигнал/шум на выходе РМ приемника.

Зависимость дальности обнаружения танка на фоне от  $\Delta\chi$  при соответствующих значениях  $H, \theta, \gamma, S_0, G$  для  $\lambda=3,2$  мм и  $\lambda=8,6$  мм приведена на рис. 8.

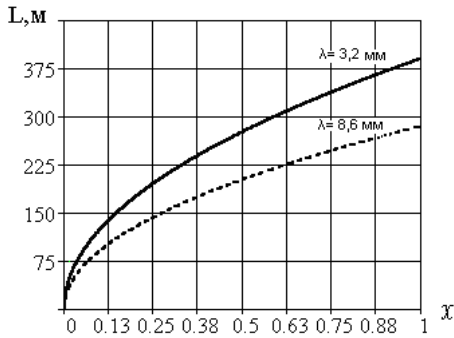


Рис 8. Зависимость дальности обнаружения модели танка от контраста коэффициента излучения объект/фон при заданной вероятности обнаружения цели  $P = 0,9$  ( $\lambda = 3,2$  мм и  $\lambda = 8,6$  мм)

Размеры площади объекта –  $S_0$  соответствуют площади танка. Коэффициент ослабления в атмосфере  $\gamma$  взят для ясной погоды равным 0,12 дБ/км для  $\lambda=8,6$  мм и 0,26 дБ/км для  $\lambda=3,2$  мм. Высота визирования РМ ССН  $H = 350$  м, гол визирования (угол атаки)  $\theta = 45^\circ$ .

Из рис. 8 видно, что при значениях  $\Delta\chi = 1$  максимальная дальность обнаружения танка на  $\lambda=8,6$  мм составляет 290 м, на  $\lambda=3,6$  мм – 380 м. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 7 и 8, показывает, что в отсутствии мер по снижению радиотепловой заметности в диапазонах длин волн  $\lambda=8,6$  мм и  $\lambda=3,2$  мм малоразмерные металлические объекты, имеющие площадь порядка 20 – 30 кв. метров, уверенно обнаруживаются РМ ССН на дальностях до 400 м на всех типовых фонах. При этом на длине волны  $\lambda = 3,2$  мм при одинаковых условиях визирования, несмотря на больший коэффициент затухания в атмосфере, значение дальности обнаружения цели увеличивается, что объясняется значительным увеличением коэффициента заполнения

луча ДНА. Инверсия радиотеплового контраста не наблюдается. Результаты оценки радиояркого контраста танка на бетоне, представленного двумя параллелепипедами в системе координат и закрытого КРП с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 12,8 + j12$ , приведены в виде графика на рис. 9.

Результаты численной оценки излучательных свойств наземного объекта на бетонном фоне в случае использования для пассивной защиты наземной техники двухслойного покрытия с параметрами прилегающей к покрытию воздушной среды  $\epsilon = 1 + j0,5$  и  $\mu = 1 + j0$  представлены на рис. 10.

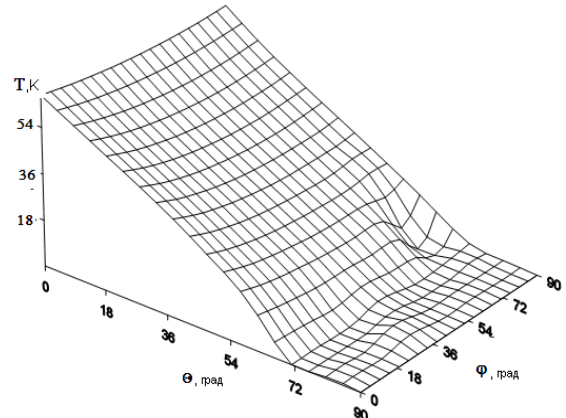


Рис. 9. Радиояркий контраст модели танка на бетоне ( $\lambda=3.2$  мм, поляризация вертикальная) покрытого КРП ( $\epsilon = 12,8 + j12$ )

При использовании для защиты наземной техники от РЛК и РМ ССН с оперативным управлением излучательных свойств за счет изменения проводимости полупроводникового слоя покрытия прикладываемым напряжением, необходимо на объекте защиты применять систему оперативного анализа характеристик фона, например, радиометр, с последующим сравнением результатов анализа с отражающими или излучательными характеристиками КРП и коррекцией последних изменением прикладываемого напряжения, что позволит еще более снизить радиолокационную и радиотепловую заметность защищаемого объекта.

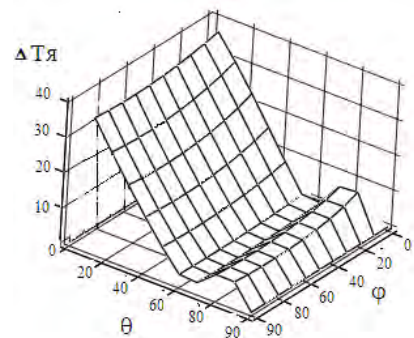


Рис. 10. Радиояркий контраст модели танка на бетоне ( $\lambda=3.2$  мм, поляризация вертикальная) в зависимости от азимутального  $\phi$  и вертикального  $\theta$  углов покрытого КРП с ионизацией прилегающей воздушной среды

## Выводы

Таким образом, результаты оценки излучательных свойств наземных объектов с пассивной защитой на основе КРП, используемых в соответствии с подходом, изложенным в статье, к снижению радиолокационной заметности, показывают, что при закрытии только сильно отражающих участков поверхности объекта может быть достигнуто существенное снижение его радиотепловой заметности. В частности, на длине волны  $\lambda=3,2$  мм величина радиояркостного контраста танка на бетонном фоне (один из наихудших случаев) при использовании однослойной структуры покрытия без ионизации прилегающего воздушного слоя в зависимости от ракурса наблюдения может быть уменьшена до значений порядка 20 – 60 К. При использовании двухслойной структуры КРП с ионизацией прилегающей воздушной среды обеспечивается снижение радиотеплового контраста наземного объекта в диапазоне рабочих углов РМ ССН до единиц Кельвина. Таким образом, применение КРП приводит к снижению радиотепловой заметности объекта в 4 – 5 раз, при этом величина вероятности его обнаружения снижается до значений 0,2 – 0,4.

## Список литературы

1. Иванов О. Пути повышения уровня защищенности зарубежной бронетанковой техники / О. Иванов // *Зарубежное военное обозрение*. – 2003. – №10. – С. 37-42.
2. Кашин В. ВТО: состояние и перспективы. Взгляд из Коломны / В. Кашин, В. Ломако, Ю. Михалевский // *Военный парад*. – 2003. – январь, февраль. – С. 28-29.
3. Дмитренко С. Тенденції розвитку високоточних артилерійських боєприпасів / С. Дмитренко // *Військо України*. – 2003. – № 7-8. – С. 28-29.
4. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами / Г.А. Андреев // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1982. – №12. – С. 3-39.
5. Волосюк В.К. Математические методы моделирования физических процессов в задачах дистанционного зондирования Земли / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко // *Успехи зарубежной радиоэлектроники. Сер.: Зарубежная радиоэлектроника*. – 2000. – №8. – С. 3-30.
6. Андреев Г.А. Радиояркие контрасты земных покровов на миллиметровых и сантиметровых волнах. *Изв. ВУЗов, радиофизика* / Г.А. Андреев, Л.Ф. Бородин, С.Н. Рубцов. – 1980. – Т. XXIII. – № 10. – С. 1266-1268.
7. Андреев Г.А. Отражение и рассеяние миллиметровых волн земными покровами / Г.А. Андреев // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1980. – № 9. – С. 3-34.
8. Шульгина Е.М. Радиотепловое зондирование земных покровов / Е.М. Шульгина // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1993. – №4. – С. 59-67.
9. Волосюк В.К. Теоретические основы пассивного дистанционного зондирования природных сред с аэрокосмических летательных аппаратов / В.К. Волосюк. – Х.: ХАИ, 1997. – 83 с.
10. Сотников А.М. Модель противодействия управляемым средствам поражения с радиометрическими головками самонаведения / А.М. Сотников, А.Б. Гаврилов // *Системы обработки информации*. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 11(39). – С. 185-190.
11. Сотников А.М. Оценка влияния условий визирования на характеристики излучательной способности различных поверхностей и покровов / А.М. Сотников, А.Б. Гаврилов // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вып. 2(42) – С. 177-182.
12. Рассказовский В.Б. Поле миллиметровых радиоволн над сушей при малых углах скольжения / В.Б. Рассказовский // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2000. – №3. – С. 3-34.
13. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / под ред. Соколова А.В. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.
14. Zweibaum F. Radiometry and military // *Photomics Spectra*. – 1986. – V.20. – № 8. – P. 113-116.

Поступила в редколлегию 22.07.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТИВІВ З ПАСИВНИМ ЗАХИСТОМ НА ОСНОВІ КОМПЗИТНИХ РАДІОІЗОТОПНИХ ПОКРИТТІВ

О.М. Сотніков, Р.Г. Сидоренко, Г.В. Рибалка, О.О. Хмелевська

Наведені результати подальшого розвитку моделі визначення випромінювальних властивостей наземних об'єктів. Розроблені методики оцінки випромінюваних властивостей наземних об'єктів з пасивним захистом на основі композитних радіоізотопних покриттів. Отримані чисельні оцінки радіояскравостей температури наземних об'єктів на типових фонах з урахуванням використання композитного радіоізотопного покриття для зниження радіолокаційної помітності.

**Ключові слова:** композитні радіоізотопні покриття, пасивний захист, випромінювальні властивості.

## RESEARCH OF RADIATION CHARACTERISTICS OF GROUND OBJECTS WITH PASSIVE PROTECTION ON BASIS OF COMPOSITE RADIOISOTOPE COVERING

A.M. Sotnikov, P.G. Sidorenko, G.V. Rybalka, O.A. Khmelevskaya

Results of further development of model for determination of radiation characteristics of ground objects are given. Methods for estimation of radiation characteristics of ground objects on basis of composite radioisotope covering are developed. Numerical estimations of brightness temperature of ground-based objects at standard backgrounds, taking into account using of composite radioisotope covering for radar cross-section decreasing, are obtained.

**Keywords:** composite radioisotope covering, passive protection, radiation characteristics.