

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ВИЗИРОВАНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОКРОВОВ

А.М. Сотников¹, А.Б. Гаврилов²

³Харьковский университет Воздушных Сил,

²Научный метрологический центр военных эталонов, Харьков)

Проведенный анализ оценки влияния условий визирования на определение излучательной способности различных поверхностей и покровов показал, что для рабочих диапазонов углов визирования значения излучательных способностей имеют незначительный разброс. Это позволяет их использовать как для оценки и прогнозирования характеристик самих радиометрических систем самонаведения (РМ ССН), так и определения условий снижения радиометрической наблюдаемости объектов с целью противодействия.

излучательная способность, радиометрическая система самонаведения

Постановка проблемы. Интенсивное развитие и широкое применение высокоточного оружия (ВТО), ставшего на сегодня наиболее эффективным средством поражения целей, обуславливает необходимость поиска эффективных мер противодействия такому оружию [1]. Поскольку в состав ВТО входят интегрированные в едином информационном поле, различающиеся по используемым физическим полям как средства разведки, так и наведения средств поражения, то естественно рассматривать задачу противодействия как задачу противодействия отдельным составляющим ВТО. Наиболее сложной по ряду тактических показателей и прежде всего в виду абсолютной скрытности является задача противодействия радиометрическим системам самонаведения, использующим в качестве основного информационного параметра радиояркостную температуру объектов.

Очевидно, что одним из возможных направлений противодействия РМ ССН является снижение радиометрической наблюдаемости объектов на различных покровах (фонах). Имеющиеся в литературе [3 – 5] данные о характеристиках излучательных способностей различных покровов и материалов не систематизированы, условия получения этих данных не определены, что затрудняет их использование для адекватного выбора материала, позволяющего обеспечить снижение радиояркостного контраста.

Возможны два пути определения излучательной способности: экспериментальный и теоретический, основанный на построении соответствующих моделей и выполнения количественных оценок.

Экспериментальное определение излучательных способностей материалов и покровов предполагает наличие соответствующей аппаратуры и адекватных условий полета летательного аппарата, временного, материального и других ресурсов, которые ограничивают выбор такого подхода. А теоретические оценки невозможны в виду отсутствия необходимых методик, позволяющих определять излучательную способность покровов и материалов в различных условиях визирования.

Анализ литературы. Вопросам оценки излучательных способностей покровов и материалов в различном диапазоне длин волн посвящено большое количество публикаций [2 – 11]. Анализ показал, что в настоящее время отсутствуют обобщенные модели, позволяющие выполнить соответствующие численные оценки в зависимости от длины волны, углов визирования, диэлектрических свойств покровов и т.п. Приведенные в [3 – 5] данные для излучательных способностей материалов и покровов невозможно использовать для точного прогнозирования результатов противодействия РМ ССН в виду отсутствия условий получения этих данных. Таким образом, *целью статьи* является получение количественных оценок излучательных способностей типовых покровов и поверхностей для конкретных условий визирования радиометрических систем.

Основная часть. Исходя из того, что миллиметровый диапазон волн расположен в спектре электромагнитных колебаний между оптическим и радиодиапазоном, исследование излучательной способности типовых покровов необходимо осуществлять на основе методов, используемых в радиотехнике и оптике.

Известно, что в реальных телах радиотепловое излучение, возникающее внутри них частично отражается поверхностью и не полностью достигает точки приема. В результате принимаемый сигнал ослабляется и кажущаяся радиояркостная температура уменьшается по сравнению с термодинамической температурой. Согласно закону Кирхгофа [2] яркостная температура пропорциональна температуре тела $T_{III} = \vartheta T$, где ϑ – излучательная способность тела.

Основываясь на основных соотношениях теории теплового излучения [5] и учитывая, что излучательная способность реальных покровов зависит от их электрофизических свойств, углов визирования, степени неровности, то в общем виде коэффициенты излучения i -го покрова можно описать выражением

$$\vartheta_i(\theta, \dot{\varepsilon}) = 1 - F_i^2(P, \theta, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_{\xi_i}), \quad (1)$$

где $F_i(P, \theta, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_{\xi_i})$ – обобщенный параметр, описывающий в зависимости от параметра Релея; P – коэффициенты отражения и рассеяния i -го по-

крова, зависящие от угла визирования θ , комплексной диэлектрической проницаемости $\dot{\varepsilon}_i$, среднеквадратической высоты неровностей $\sigma_{\xi i}$.

Поверхности типовых покровов в зависимости от длины волны можно рассматривать как гладкие, квазигладкие и хаотически неровные. Для оценки излучательной способности в случае гладкой границы раздела сред используют коэффициенты излучения Френеля, содержащие относительную комплексную диэлектрическую проницаемость и угол визирования. В случае хаотически неровной поверхности излучательную способность оценивают в приближении метода возмущений [5] для квазигладких покровов или метода касательной плоскости в случае, когда высота неровностей во много раз превосходит длину волны [6].

В качестве критерия, определяющего выбор того или иного метода используют параметр Рэлея

$$P = 2k\sigma_{\xi i} \cos \theta, \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Для излучающей среды с гладкой границей раздела ($\sigma_{\xi i} \approx 0$) параметр $F_i(P, \theta, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_{\xi i})$ характеризуется коэффициентом отражения Френеля $V_i(\theta, \dot{\varepsilon})$ и в результате выражение для коэффициента излучения покрова будет иметь вид

$$\mathcal{R}_i(\theta, \dot{\varepsilon}) = 1 - |V_i(\theta, \dot{\varepsilon})|^2, \quad (3)$$

где для вертикальной поляризации

$$V_i(\theta, \dot{\varepsilon}_i) = \frac{(\varepsilon_i + j\varepsilon_i'') \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_i - \sin^2 \theta + j\varepsilon_i''}}{(\varepsilon_i + j\varepsilon_i'') \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_i - \sin^2 \theta + j\varepsilon_i''}}.$$

Для покровов с $\sigma_{\xi i} \neq 0$ при $P < 1$ в приближении метода возмущений для вертикальной поляризации параметр $F_i(\theta_i, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_{\xi i})$ будет определяться в соответствии с выражением

$$F_i(P, \theta, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_{\xi i}) = \frac{\cos \theta - \eta_{\xi i}}{\cos \theta + \eta_{\xi i}}, \quad (4)$$

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

Согласно [6] $\eta_{\xi i}$ описывается выражением

$$\eta_{\xi i} = \eta_{0i} + k^2 \sigma_{\xi i}^2 \cos \theta (\cos^2 \theta - \eta_{0i}^2), \quad \eta_{i0} = (\sqrt{\dot{\varepsilon}_i})^{-1}. \quad (5)$$

Для покровов, у которых параметр Рэлея $P > 1$ в приближении метода касательной плоскости параметр $F_i(\theta_i, \dot{\varepsilon}_i, \sigma_{\xi i})$ описывается при-

ближенно с использованием плоского альbedo $a(\theta)$ – коэффициента рассеяния хаотической поверхностью энергии радиотеплового излучения в полусферу с телесным углом 2π .

В [6] показано, что при нормальном законе распределения высот неровностей, с учетом $P > 1$, параметр $F_i(\theta_i, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i})$ описывается выражением

$$F_i(\theta_i, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}) = V_i(\theta_i, \dot{\epsilon}_i) \cdot V_{Si}(\theta_i, \sigma_{\xi_i}), \quad (6)$$

где $V_{Si} = \exp(-2k^2 \sigma_{\xi_i}^2 \cos^2 \theta)$ – множитель, учитывающий частичное разрушение зеркального отражения под влиянием неровностей.

Таким образом, модель для математического представления зависимости излучательной способности i -го покрова от угла визирования, среднеквадратического отклонения высот неровностей σ_{ξ_i} и значений относительной комплексной диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}_i$ будет иметь вид

$$\vartheta_i(\theta, \dot{\epsilon}_i) = 1 - \left[\left| F_i(\theta, \dot{\epsilon}_i, \sigma_{\xi_i}) \right|^2 = \left. \begin{cases} |V_i(\theta, \dot{\epsilon}_i)|^2, & \text{при } \sigma_{\xi_i} \approx 0 \\ \frac{|\cos \theta - \eta_{\xi_i}|^2}{|\cos \theta + \eta_{\xi_i}|^2}, & \text{при } P_i < 1 \\ |V_i(\theta, \dot{\epsilon}_i) \cdot V_{Si}(\theta, \sigma_{\xi_i})|^2, & \text{при } P_i > 1 \end{cases} \right] \right]. \quad (7)$$

Воспользовавшись данными о характеристиках типовых покровов, приведенных в [7 – 9] (табл. 1), с использованием выражения (7) были получены зависимости излучательной способности типовых фонов от угла визирования θ для $\lambda = 8,6$ мм и $\lambda = 3,2$ мм, приведенные на рис. 1, 2.

Таблица 1

Характеристики типовых покровов

Вид покрова (фона)	ϵ	ϵ''	$\sigma_{\xi}, \text{ м}$	$\lambda, \text{ мм}$
Асфальт	2,5	$60 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	8,6
	2,25	$20 \cdot 10^{-2}$		3,2
Бетон	5,5	$50 \cdot 10^{-2}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	8,6
	5,5	$40 \cdot 10^{-2}$		3,2
Песок	4	$41 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	8,6
	2,5	$6 \cdot 10^{-2}$		3,2
Вода	19,5	29	$0,08 \cdot 10^{-3}$	8,6
	6,42	8,24		3,2
Трава	1,1	$8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	8,6
	1,1	$16 \cdot 10^{-2}$		3,2
Глинистая пашня	7,2	3	$30 \cdot 10^{-3}$	8,6
	6,1	1		3,2

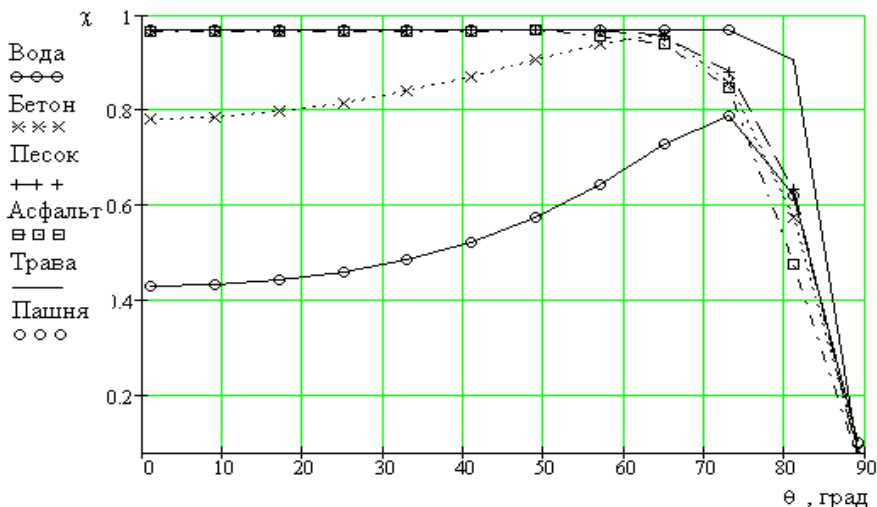


Рис. 1. Зависимость излучательной способности покровов от угла визирования при $\lambda = 3,2$ мм

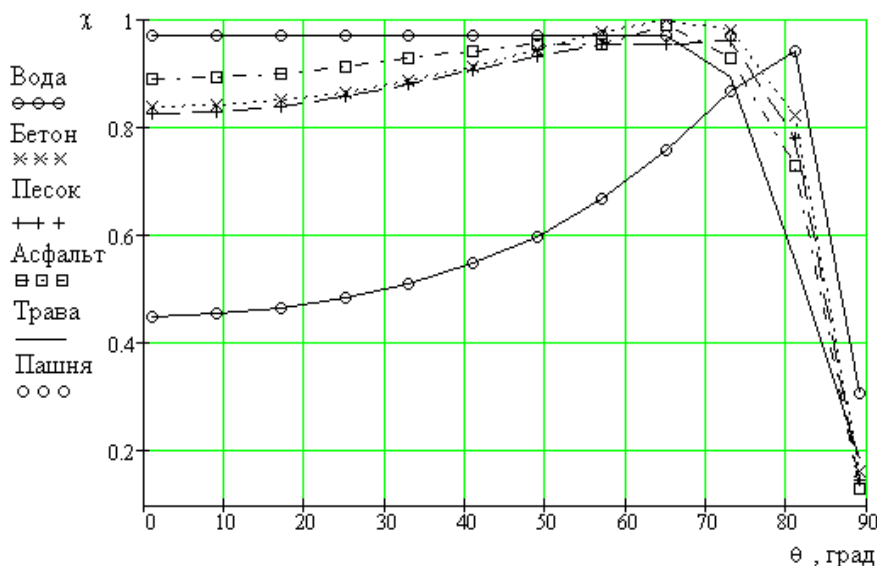


Рис. 2. Зависимость излучательной способности покровов от угла визирования при $\lambda = 8,6$ мм

Анализ графиков, приведенных на рис. 1, 2 показывает, что для рабочих диапазонов углов визирования РМ ССН значения излучательных

способностей имеют незначительный разброс и составляют величины порядка от 0,85 ... 0,98, что соответствует имеющимся экспериментальным данным и позволяет их использовать как для оценки и прогнозирования характеристик самих РМ ССН, так и определения условий снижения радиометрической наблюдаемости объектов с целью противодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В., Рохманов А. ВТО: Роль и место в вооруженных конфликтах. Основные тенденции развития // Военный парад. – Январь-февраль 2003. – С. 16 – 18.
2. Мельник Ю.А., Зуськевич Т.С., Степаненко В.О. и др. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю.А. Мельника – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
3. Андреев Г.А., Бородин Л.Ф., Рубцов С.Н. Радиояркостные контрасты земных покровов на миллиметровых и сантиметровых волнах // Изв. ВУЗов. Радифизика. – 1980. – Т. XXIII, № 10. – С. 1266 – 1268.
4. Андреев Г.А., Голунов В.А. Радиолинии радиояркостных контрастов земных покровов на волнах 8 и 2 мм. // Труды Всесоюзной школы симпозиума по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере – М.: 1983. – С. 61 – 66.
5. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1982. – № 12. – С. 3 – 38.
6. Расказовский В.Б. Поле миллиметровых радиоволн над сушей при малых углах скольжения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – №3. – С. 3 – 34.
7. Bass F.G., Fulks I.M., Kalmykov A.L., et al. // IEEE Trans, 1968, v. AP-16, N5.
8. Ulaby F.T., Fung A.K., Stiles W.H. Backscattering and emission of snow (Literature review and recommendations for future investigations). The University of Kansas Center for Research, RSL Techn. Rep. 369 – 1. 1978.
9. Shanda E., Hoffer R. Proc. URCI Meeting on Microwave Scattering and Emission from Earth. Univ. Of Bearn, Switzerland, 1974.
10. Razskazovsky V.B., Pedenko, Yu.A., Logvinov, Yu.F. Attenuation Factor for X- and Ka-Band near Sea Surface // Third Int. Kharkov Symp. "Physics and Eng. Of Millimeter and Submillimeter Waves". – Kharkov, September, 15–17, 1998, Symp. Proc. – Vol. 2. – P. 455 – 457.
11. Логвинов Ю.Ф., Педенко Ю.А., Разказовский В.Б. Дифракционная модель многолучевого распространения над неровной поверхностью при малых углах скольжения // Изв. ВУЗов. Сер. Радиофизика. – 1996. – Т. 39, №5. – С. 547 – 558.

Поступила 28.02.2005

Рецензент: доктор физико-математических наук, профессор В.Ф. Клепиков, НТЦ электрофизической обработки НАН Украины, Харьков.