

УДК 537.877

*А. А. Голумеев, У. Г. Ибрагимов, Н. Д. Карасев, М. А. Кудров, Д. А. Леонов,
Д. С. Олькина*

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Физико-математическое моделирование эффективной площади отражения местности с учетом различных типов подстилающих поверхностей

Разработан программный комплекс для моделирования ЭПО местности. В данной работе представлены некоторые методы и подходы по моделированию ЭПО подстилающей поверхности. Рассмотрено несколько типов поверхностей: водная поверхность с заданной силой ветра на 10 м над уровнем моря, ледовая поверхность (однослойная), бетонные и асфальтовые дороги. Также представлен известный метод полуэмпирического моделирования: метод постоянной γ .

Ключевые слова: длина электромагнитной волны, поляризация, комплексный коэффициент преломления, компьютерное моделирование.

*A. A. Golumeev, U. G. Ibrahimov, N. D. Karasev, M. A. Kudrov, D. A. Leonov,
D. S. Olkina*

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Physico-mathematical modeling of effective (or scattering, or radar) cross-section of the area with account taken of different types of underlying surfaces

Software package for modeling of RCS of the area is developed. At the present work some methods and approaches of modeling RCS of underlying surfaces are presented. Some surface types are considered: water surface with a given wind force at 10 m above sea level, ice surface (single-layer), concrete and asphalt roads. Moreover, a well-known method of semi-empirical modeling is presented: constant method γ .

Key words: electromagnetic wave, polarization, complex refractive index, computer modeling.

1. Введение

В связи с ростом интереса к освоению Арктики, оптимизации природных ресурсов, оценки качества транспортных магистралей, введению разработок РЛС комплексов возникает необходимость усовершенствования средств мониторинга ледовых покрытий, обширных лесных массивов, состояний искусственных покрытий. К настоящему времени накоплен богатый опыт зондирования и разработаны эффективные методы обработки рассеянных сигналов с целью опознания объекта [1–6].

В настоящей работе использованы некоторые из этих методов в целях создания программного комплекса, моделирующего сложную подстилающую поверхность.

Известно, что моделирование ЭПО сопряжено с большими трудностями ввиду непредсказуемости рельефа подстилающей поверхности, а также физико-химических свойств материала облучаемого объекта. В этой ситуации моделирование ЭПО отраженного сигнала возможно только статистически или полуэмпирически.

© Голумеев А. А., Ибрагимов У. Г., Карасев Н. Д., Кудров М. А., Леонов Д. А., Олькина Д. С., 2018

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2018

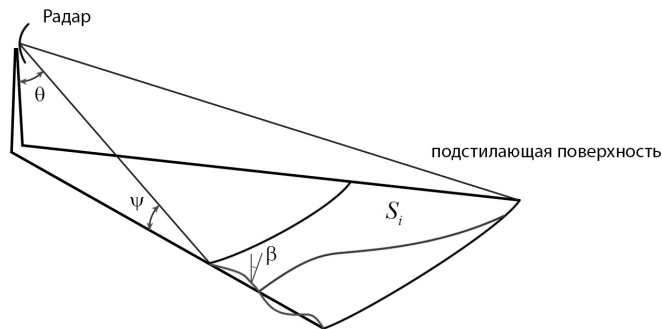


Рис. 1. Схема облучения подстилающей поверхности радаром

2. Моделирование ЭПО водной и ледовой поверхности

Статистическое определение ЭПО шероховатой подстилающей поверхности имеет вид [1]:

$$\sigma_{pq} = 4\pi R_0^2 \frac{\langle E_p^s E_p^{s*} \rangle}{E_q^i E_q^{i*}},$$

где p и q – индексы поляризации, E_q^i – падающее электромагнитное поле, E_p^s – отраженное поле, R_0 – расстояние от излучателя (приемника) до облучаемой цели, скобки означают осреднение по поверхности. Ясно, что в зависимости от величины амплитуды неровностей по отношению к длине волны могут быть использованы различные подходы.

Ниже рассмотрены два метода моделирования ЭПО воды и льда [1, 2]: приближение Кирхгофа и метод малых возмущений. Первый из них годится для шероховатых поверхностей большой амплитуды, второй – соответственно для шероховатой поверхности малой амплитуды.

ЭПО отраженного сигнала по Кирхгофу имеет вид

$$\sigma_{pq} = \frac{\pi k^2 \|Q\|^2}{q_z^4} \cdot |U_{pq}|^2 \cdot \text{Prob}(-q_x/q_z, -q_y/q_z).$$

Входящие сюда величины определены в работе [1, 2]; множитель $\text{Prob}(-q_x/q_z, -q_y/q_z)$ – двумерная функция вероятности шероховатой поверхности, в частном случае волнистой поверхности воды.

Скорость ветра U_{10} измеряется на высоте 10 м над уровнем моря. В этом случае

$$\text{Prob}(\xi, \eta) = \frac{G_4(\xi/\sigma_c, \eta/\sigma_u)}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left(-\frac{(\xi/\sigma_c)^2 + (\eta/\sigma_u)^2}{2}\right).$$

Приведенные здесь величины имеют следующий вид:

$$\sigma_c = \sqrt{0.003 + 0.00192U_{10}}, \quad \sigma_u = \sqrt{0.00316U_{10}}.$$

$$G_4(\xi, \eta) = 1 - 0.5A_{21}(\xi^2 - 1)\eta - 1/6A_{03}(\eta^3 - 3\eta) + 1/24A_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + 1/4A_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + 1/24A_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3),$$

$$A_{21} = 0.01 - 0.0086U_{10}, \quad A_{03} = 0.04 - 0.033U_{10}, \quad A_{40} = 0.4, \\ A_{22} = 0.12, \quad A_{04} = 0.23.$$

Данная модель применима для скоростей ветра в диапазоне от 1 до 15 м/с.

Далее рассмотрим метод малых возмущений. В этом случае ЭПО сигнала имеет вид

$$\sigma_{pq} = 8k^3 |\cos\theta_i \cos\theta_s \alpha_{pq}|^2 S(k_x, k_y). \quad (1)$$

Входящие в это выражение величины определены в [1, 2]. $S(k_x, k_y)$ – спектр высот морских возмущений. Приведем вкратце описание этого спектра, подробно рассмотренного в работе [3].

Выражение для $S(k_x, k_y)$ имеет вид в полярных координатах ($k_x = k \cos \varphi, k_y = k \sin \varphi$):

$$S(k, \varphi_s) = k^{-3}(B_l + B_h)(1 + \Delta(k) \cos 2\varphi_s).$$

Здесь $B_l(k) = 0.003\Omega^{0.55} \frac{c_p}{c(k)} F_p(k)$, $c_p \approx 1.17U_{10}$ – фазовая скорость на спектральном пике, $c(k) = \sqrt{g/k}$ ($g=9.81$) – фазовая скорость волны.

Далее, $F_p(k) = \exp(-\frac{5}{4}(k_p/k)^2) J_p(k) \exp(-\frac{\Omega}{\sqrt{10}}(\sqrt{k/k_p} - 1))$, $\Omega \approx U_{10}/c_p$; $J_p(k) = \gamma^{\Gamma(k)}$, $\gamma = 1.7 + 6 \ln(\Omega)$, $\Gamma(k) = \exp(-(\sqrt{k/k_p} - 1)^2/2\sigma^2)$, $\sigma = 0.08(1 + 4\Omega^{-3})$, $k_p = g\Omega^2/U_{10}^2$ – волновое число на спектральном пике.

Функция $B_h(k) = 0.5\alpha_m \frac{c_m}{c(k)} F_m(k)$. Здесь $\alpha_m = 0.014u^*/c_m$, $u^* \approx 0.4\text{м/с}$ – скорость турбулентных пульсаций у поверхности моря, $c_m \approx 0.23\text{м/с}$ – фазовая скорость на спектральном минимуме: $F_m(k) = \exp(-0.25(k/k_m - 1)^2)$, $k_m \approx 378\text{м}^{-1}$ – волновое число на спектральном минимуме.

$$\Delta(k) = th[\alpha_0 + \alpha_p(c(k)/c_p)^{2.5} + \alpha_m(c_m/c(k))^{2.5}], \alpha_0 = (\ln 2)/4, \alpha_p = 4.$$

Видно, что данный спектр сильно зависит от волнового числа k падающей волны, а также от скорости ветра U_{10} , как и в модели Кирхгофа.

Расчет ЭПО ледовой поверхности проводился согласно однослойной модели ледового пласта [4]. Общие выражения для двух поляризаций электромагнитной волны имеют вид

$$\sigma_{hh} = 8k^3 |\cos^2 \theta_s \alpha_{hh}|^2 \frac{(hl)^2}{4\pi} \frac{1}{(1 + (2k \sin \theta l)^2)^{1.5}},$$

$$\sigma_{vv} = 8k^3 |\cos^2 \theta_s \alpha_{vv}|^2 \frac{(hl)^2}{4\pi} \frac{1}{(1 + (2k \sin \theta l)^2)^{1.5}}.$$

Здесь h – среднеквадратичная высота неровностей ледовой поверхности, l – корреляционная длина неровностей. Коэффициенты α_{pq} – такие же, как и в выражении (1).

3. Моделирование ЭПО асфальтовых и бетонных дорог

Расчет ЭПО асфальтовых и бетонных дорог можно провести при помощи метода, аналогичного методу малых возмущений, в силу того что размеры характерных шероховатостей этих поверхностей можно считать много меньшими длины облучающей волны для сантиметровых диапазонов. Выражение для ЭПО сигнала в этом случае имеет вид [5]:

$$\frac{\sigma_0}{\sin \theta} = \gamma = 8 \sin^2 \theta T \langle z^2 \rangle k^4 \int_0^\infty \rho(r) J_0(2kr \cos \theta) r dr,$$

где θ – угол падения, отсчитываемый от горизонтали, $\langle z^2 \rangle$ – среднеквадратичная высота неровностей, $\rho(r)$ – автокорреляционная функция неровностей на поверхности, $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка. Коэффициенты Френеля при вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно имеют вид

$$T_h = \left[\frac{\varepsilon_1 + i\varepsilon_2 - 1}{\{\sin \theta + (\varepsilon_1 + i\varepsilon_2 - \cos^2 \theta)^{1/2}\}^2} \right]^2,$$

$$T_v = \left[\frac{(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2 - 1)[(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2)(1 + \cos^2 \theta) - \cos^2 \theta]}{\{(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2) \sin \theta + (\varepsilon_1 + i\varepsilon_2 - \cos^2 \theta)^{1/2}\}^2} \right]^2,$$

где $\varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ – комплексная диэлектрическая проницаемость.

Выражение автокорреляционной функции и диэлектрической проницаемости для бетона имеют вид

$$\rho(r) = \exp(-7r)r, \text{ см}, \overline{z^2} = 2,6 * 10^{-4} \text{ см}^2, \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \approx 6,5 + i1,5;$$

для асфальта:

$$\rho(r) = [1 + 20r^2]^{-3/2}, \text{ см}, \overline{z^2} = 1,6 * 10^{-3} \text{ см}^2, \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \approx 4,3 + i0,1.$$

4. Моделирование ЭПО сложной местности

Таким образом, выше были рассмотрены аналитические методы расчета слабошероховатых поверхностей. Однако в случае отражения от сложного рельефа, например местности, покрытой лесом, трудно построить аналитическую модель. В связи с этим предлагается полуэмпирический метод, так называемый «постоянной γ ».

Выражение ЭПО некоторой местности (без учета поляризации) в данном подходе имеет вид [6]:

$$\sigma^0 = \sigma F_A^4 = \gamma \sin \psi F_A^4,$$

где ψ – угол падения, отсчитываемый от горизонтали, γ – параметр, описывающий отражающую способность покрова (определяется эмпирически); F_A (pattern propagation factor) – поправка, вводимая для принимаемого радаром сигнала вследствие присутствия подстилающей поверхности. Для небольших углов ψ можно записать:

$$F_c \approx \frac{\psi}{\psi_c} = \psi \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \approx \frac{R_1}{R},$$

где ψ_c – критический угол падения, σ_h – среднеквадратичная высота неровностей на поверхности. Для углов, больших ψ_c , полагают $F_c \approx 1$.

Т а б л и ц а 1

Параметры подстилающей поверхности

Тип поверхности	Коэффициент γ (Дб)	σ_h – ср. кв. высота	Ср. кв. Скат β_0
Горы	-5	100	0,1
Городская местность	-5	10	0,1
Лестные холмы	-10	10	0,05
Горные холмы	-12	10	0,05
Пустынная местность	-15	3	0,03
Равнины	-20	1	0,02
Плоская местность	-25	0,3	0,01.

При стремлении $\psi \rightarrow \pi/2$ ЭПО описывают с помощью выражения «квазизеркального» отражения [6]:

$$\sigma_f^0 = \frac{\rho^2}{\beta_0^2 + 0.36\theta_{\text{@}}^2} \exp\left[\frac{\beta^2}{\beta_0^2 + 0.36\theta_{\text{@}}^2}\right],$$

где β – угол падения, отсчитываемый от вертикали, β_0 – среднеквадратичный угол ската неровностей на поверхности. $\theta_{\text{@}}$ – угловая ширина сигнала, посылаемая радаром, $\rho = \rho_0\rho_s\rho_v$ – коэффициент отражения, определяемый через коэффициент Френеля ρ_0 , эффективный коэффициент отражения от шероховатой поверхности ρ_s и коэффициент поглощения в присутствии растительности ρ_v .

Формулы для расчета этих коэффициентов для вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно имеют вид [6]:

$$\rho_0^v = \frac{\sin \psi - \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \psi}},$$

$$\rho_0^h = \frac{\varepsilon_c \sin \psi - \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \psi}}{\varepsilon_c \sin \psi + \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \psi}}.$$

Здесь $\varepsilon_c = \varepsilon_r - i60\lambda\sigma_\varepsilon$ – комплексная диэлектрическая проницаемость.

Т а б л и ц а 2

Диэлектрическая и магнитная проницаемости различных типов материалов подстилающих поверхностей

Материал	ε_r	σ_ε
Влажная почва	25	0,02
Почва	15	0,005
Сухая почва	3	0,001
Снег, лед	3	0,001
Пресная вода ($\lambda = 1m$)	81	0,7
Пресная вода ($\lambda = 0,03m$)	65	15
Соленая вода ($\lambda = 1m$)	75	5
Соленая вода ($\lambda = 0,03m$)	60	15

$$\rho_s = \exp[-0.5(\frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \sin \psi)^2],$$

$$\rho_v \approx \begin{cases} -5 \text{ Дб, тонкая трава,} \\ -15 \text{ Дб, низкие кустарники,} \\ -25 \text{ Дб, густые деревья.} \end{cases}$$

Сшивка функций σ^0 и σ_f^0 проводится из условия $\sigma^0(\psi_0) = \sigma_f^0(\psi_0)$.

5. Основные результаты моделирования

Рассмотренные выше математические модели легли в основу программного комплекса по моделированию отраженного радиосигнала от земной поверхности. Пример распределения ЭПО отраженного сигнала по углу θ (см. рис. 1), отсчитываемого от вертикали, представлен на рис. 2, 3 для водной и ледовой поверхностей.

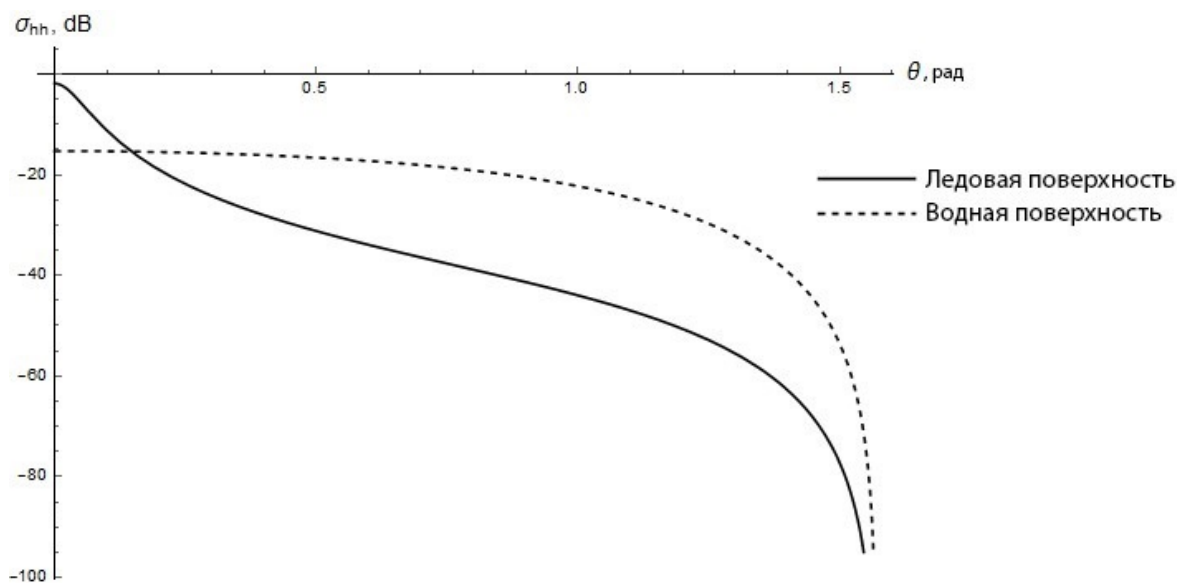


Рис. 2. ЭПО водной поверхности при $U_{10} = 10$ м/с, $\lambda = 1$ м/с

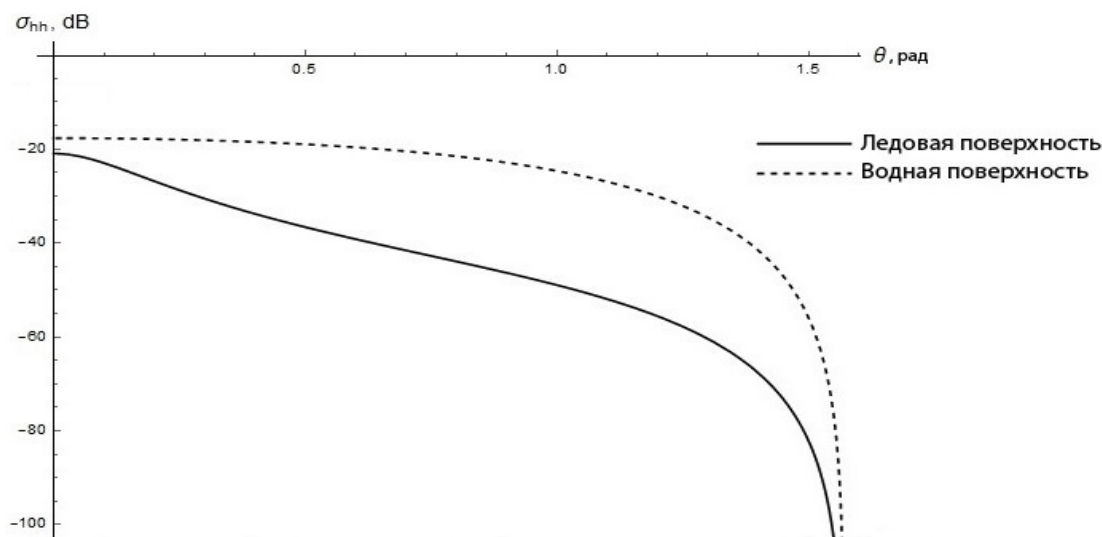


Рис. 3. ЭПО водной поверхности при $U_{10} = 10$ м/с, $\lambda = 3$ м/с

Видно, что при увеличении угла θ происходит монотонное падение ЭПО отраженного сигнала. Аналогичная картина наблюдается и в распределении для других типов поверхностей.

В разработанном программном комплексе задается высота установки радара над уровнем моря и облучаемый сектор (рис. 1), в который, вообще говоря, входят различные виды поверхностей (например, леса и водоемы). Для определения ЭПО отраженного сигнала от смешанного типа поверхности применяется следующее соотношение:

$$\sigma = \frac{\sum_i \sigma_i S_i}{\sum_i S_i},$$

где σ_i – ЭПО данного типа поверхности, S_i – его площадь. Таким образом удастся определить приближенное ЭПО для данного облучаемого сектора.

6. Заключение

На основе известных аналитических и полуэмпирических моделей ЭПО отраженного сигнала создан программный комплекс моделирования ЭПО местности. Приведены иллюстрации расчетов для некоторых типов поверхности. Разработанный комплекс имеет практический интерес для виртуального испытания проектируемых РЛС установок.

Статья подготовлена по государственному заданию № 8.12870.2018/12.1.

Литература

1. *Vaitilingom L., Khenchaf A.* Radar cross sections of sea and ground clutter estimated by two scale model and small slope approximation in HF-VHF bands // J. Progress in Electromagnetics Research B. 2011. V. 29. P. 311–338.
2. *Khenchaf A.* Bistatic scattering and depolarization by randomly rough surfaces: application to the natural rough surfaces in X-band // J. Waves in Random Media. 2001. V. 11. P. 61–89.
3. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. of Geophysical Research. 1997. V. 102, N C7. P. 15781–15796.

4. *Firoozy N.* Radar Cross Section Data Inversion for Snow-Covered Sea Ice Remote Sensing // FGS – Electronic Theses & Dissertations. 2015. P. 1–216.
5. *Peake W.H.* Theory of radar return from terrain // 1958 IRE International Convention Record. 1966. P. 27–41,
6. *Barton D.K.* Radar System Analysis and Modeling // Artech House. 1988.

References

1. *Vaitilingom L., Khenchaf A.* Radar cross sections of sea and ground clutter estimated by two scale model and small slope approximation in HF-VHF bands. J. Progress in Electromagnetics Research B. 2011. V. 29. P. 311–338.
2. *Khenchaf A.* Bistatic scattering and depolarization by randomly rough surfaces: application to the natural rough surfaces in X-band. J. Waves in Random Media. 2001. V. 11, P. 61–89.
3. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves. J. of Geophysical Research. 1997. V. 102, N C7. P. 15781–15796.
4. *Firoozy N.* Radar Cross Section Data Inversion for Snow-Covered Sea Ice Remote Sensing. FGS – Electronic Theses & Dissertations. 2015. P. 1–216.
5. *Peake W.H.* Theory of radar return from terrain. 1958 IRE International Convention Record. 1966. P. 27–41,
6. *Barton D.K.* Radar System Analysis and Modeling. Artech House. 1988.

Поступила в редакцию 24.10.2018