

621.396.96

...

...

Запропоновано метод розрахунку характеристик вторинного випромінювання радіолокаційних об'єктів резонансних розмірів з урахуванням впливу підстилюючої поверхні. Метод базується на розв'язанні інтегрального рівняння магнітного поля, ядром якого є напруженість електричного поля магнітного диполя, розташованого над межею поділу діелектричних середовищ. Обговорюються особливості обчислення ядра зазначеного інтегрального рівняння. Демонструються результати розрахунку діаграм вторинного випромінювання крилатої ракети у вільному просторі та з урахуванням електромагнітної взаємодії з поверхнею суші та моря.

...

() [10-12].
 () [1-13],

(), [6]

1.
 (z>0)
 $\epsilon_1 = 1$
 S
 (z<0),

[12]

$$V_2 = V_2' + iV_2'', \quad V_2', V_2'' = \frac{\dagger_2}{\check{S}V_0} -$$

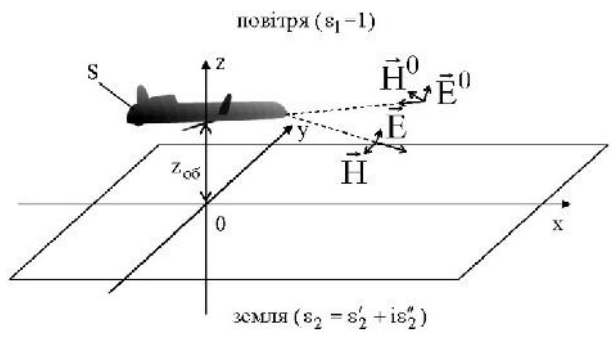
$\sigma_2 -$, $\omega -$, $\varepsilon_0 -$, $\mu=1$, [14]

(), " , - " (\vec{E}, \vec{H}), \vec{E}^m, \vec{H}^m),

$$\left\{ \begin{aligned} & -\vec{r}_2^0 \cdot \vec{J}(\vec{Q}_0) + 2\vec{r}_1^0 \cdot \vec{H}^0(\vec{Q}_0) = \\ & = \frac{2}{i\tilde{S}} \int_S \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}_1^0) \cdot \vec{J}(\vec{Q}) ds_Q, \\ & \vec{r}_1^0 \cdot \vec{J}(\vec{Q}_0) + 2\vec{r}_2^0 \cdot \vec{H}^0(\vec{Q}_0) = \\ & = \frac{2}{i\tilde{S}} \int_S \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}_2^0) \cdot \vec{J}(\vec{Q}) ds_Q, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$\vec{Q}_0, \vec{Q} \in S -$, $\vec{r}_1^0, \vec{r}_2^0 -$ S \vec{Q}_0 , \vec{n}^0 ; $\vec{J}(\vec{Q}) = \vec{n} \times \vec{H}(\vec{Q}) -$; $\vec{H}^0, \vec{H} -$

; $\vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}^0) -$ () - \vec{r}^0 , " - " .



1. " " (1) S

[11]. $\vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}^0)$.

$$\vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}^0) = \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}^0) + \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}^0), \quad (2)$$

$$\vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{r}^0) = -i\tilde{S}(\vec{r}^0 \times \vec{\nabla} G(\vec{Q}_0, \vec{Q})), \quad (3)$$

$$G(\vec{Q}_0, \vec{Q}) = G(R) = \exp(ik_1 R)/4fR, \quad (4)$$

$R = |\vec{Q} - \vec{Q}_0|$; $k_1 = 2f/\lambda_0$, $\lambda_0 -$ z=0 G(R) (4), [15-19].

\vec{E}^m [15-21].

\vec{E}^m , 2, \vec{E}^m

$$\vec{E}^m = (\vec{v}^e \dots + \vec{v}^e \dots) \frac{k_1 \tilde{S}}{4f} \Omega(\vec{Q}_0, \vec{Q}), \quad (5)$$

(\vec{E}, \vec{E}^m) (\vec{E}, \vec{E}^m) ; $\vec{v}^e = \vec{v}_1(\vec{v}_1 \cdot \vec{v}^e)$,

$\vec{v}_1 -$, $\vec{v}^e = \vec{v}^e - \vec{v}^e$, $\vec{v}^e = \vec{v}^h \times \vec{R}^{02}$, $\vec{v}^h = -\vec{v}^{0h} + 2\vec{n}(\vec{n} \cdot \vec{v}^{0h})$, $\vec{v}^{0h} = \vec{r}^0 - \vec{R}^{01}(\vec{r}^{01} \cdot \vec{r}^0)$, $\vec{R}^{01} = \vec{R}_1|\vec{R}_1|^{-1}$, $\vec{R}^{02} = \vec{R}_2|\vec{R}_2|^{-1} -$

$$\vec{R}_1 = \vec{Q}' - \vec{Q}_0, \vec{R}_2 = \vec{Q} - \vec{Q}' \quad (1)$$

2),

$$\vec{n} = (0 \ 0 \ 1) \quad (2)$$

$$\dots = \frac{W_2 \cos(\alpha_1) - W_1 \cos(\alpha_2)}{W_2 \cos(\alpha_1) + W_1 \cos(\alpha_2)}, \quad (6)$$

$$\dots = \frac{W_2 \cos(\alpha_2) - W_1 \cos(\alpha_1)}{W_2 \cos(\alpha_2) + W_1 \cos(\alpha_1)} \quad (7)$$

[14],

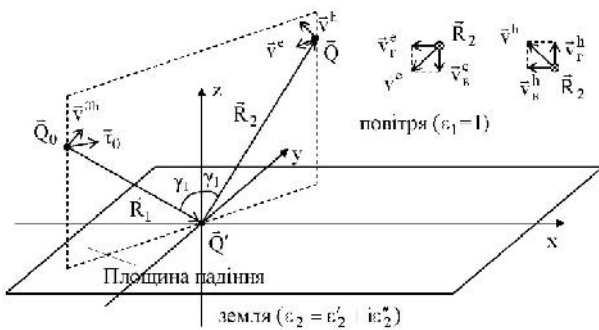
$$W_1 = 120f, W_2 = W_1 v_2^{-0.5}$$

$$\alpha_1 = r/(z + z_0) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \arcsin(\sin(\alpha_1) v_2^{-0.5}),$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2};$$

$$\Omega(\vec{Q}_0, \vec{Q}) = \exp(-ik_1(|\vec{R}_1| + |\vec{R}_2|)) / (|\vec{R}_1| + |\vec{R}_2|).$$



$$\vec{Q}_0 = (x_0, y_0, z_0), \vec{Q}' = (x', y', 0), \vec{Q} = (x, y, z)$$

.2.

$$\vec{H}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{F}^0) = \vec{H}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{F}^0) + \vec{H}^m(\vec{Q}|\vec{Q}', \vec{F}^0) \quad (8)$$

$$\vec{H}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{F}^0) = \sim_0^{-1} [\vec{F}^0 k_1^2 G(\vec{Q}_0, \vec{Q}) + \vec{\nabla}(\vec{F}^0 \cdot \vec{\nabla} G(\vec{Q}_0, \vec{Q}))], \quad (9)$$

~0 -

$$\vec{H}^m = (\vec{v}^h \dots + \vec{v}^h \dots) \frac{k_1 \tilde{S}}{4fW_0} \Omega(\vec{Q}_0, \vec{Q}), \quad (10)$$

$$\vec{v}^h = \vec{v}_1(\vec{v}_1 \cdot \vec{v}^h), \vec{v}^h = \vec{v}^h - \vec{v}^h \quad (11)$$

$$-\vec{H}^e, \quad (9), (10) \quad \mu_0 \quad v_0 \quad \vec{H}^m \quad \vec{E}^e. \quad (3) (5) \vec{E}^m$$

$$\vec{F}^0 \quad (5) (10) \quad \vec{E}^m, \vec{H}^m \quad 1 \%$$

[14-20]

$$z_0, z \quad \} z_0$$

, z < }_0

G(R)

$$[14-20]. \quad (1),$$

[11, 12]

N, S

(1)

$$\begin{cases} J_{2,n_0}^e A_{n_0,n_0}^{12} + \sum_{\substack{n=1 \\ (n \neq n_0)}}^N [J_{1,n}^e A_{n_0,n}^{11} + J_{2,n}^e A_{n_0,n}^{12}] = B_{1,n_0}, \\ J_{1,n_0}^e A_{n_0,n_0}^{21} + \sum_{\substack{n=1 \\ (n \neq n_0)}}^N [J_{1,n}^e A_{n_0,n}^{21} + J_{2,n}^e A_{n_0,n}^{22}] = B_{2,n_0}, \end{cases} \quad (11)$$

$$n_0 = \overline{1, N}, \quad n = \overline{1, N}$$

$$J_{1(2),n} = J_{1(2),n}^- \cdot \vec{J}_n;$$

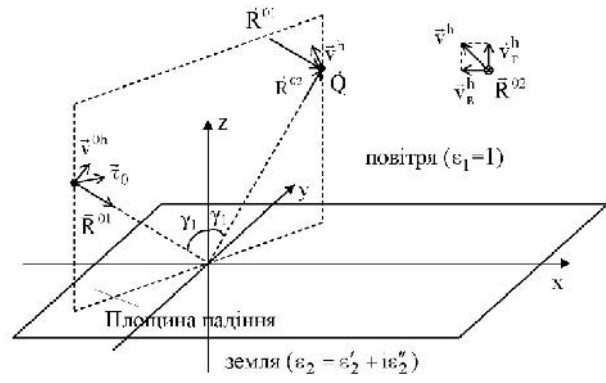
$$A_{n_0,n}^{pq} = \begin{cases} (-1)^q + r(\vec{Q}_{n_0}) + \\ + \frac{2}{i\tilde{S}} \int_{s_{n_0} \setminus s_0} (-\vec{e}_{q,n_0} \cdot \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_{n_0}, -\vec{e}_{p,n_0})) ds_Q, \\ n = n_0, \\ \frac{2}{i\tilde{S}} \int_{s_n} (-\vec{e}_{q,n} \cdot \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_{n_0}, -\vec{e}_{p,n_0})) ds_Q, \\ n \neq n_0; \end{cases} \quad (12)$$

p=1, 2; q=1, 2;

$$B_{p,n_0} = 2_{p,n_0}^- \cdot \vec{H}^0(\vec{Q}_{n_0}). \quad (13)$$

(12)

$$\begin{aligned}
 & n = n_0 \\
 & S_{n_0}, \\
 & (\vec{Q} = \vec{Q}_{n_0}), \\
 & S_0, \\
 & [11, 12].
 \end{aligned}$$



3.

$$\begin{aligned}
 & S_{n_0}, \\
 & \approx (0, 0, 2 \dots 0, 2) \}_0, \\
 & S_n,
 \end{aligned}$$

\vec{Q}_0

(8) - (10)

(8) - (10)

(12)

$$\vec{E}^m \approx \vec{E}^m, \quad n = n_0,$$

$$\vec{E}^m = \vec{E}^m + \vec{E}^m, \quad n \neq n_0,$$

\vec{E}^m \vec{E}^m
(3) (5)

[5, 11].

(1)

$$\vec{H}^0(\vec{Q}_{n_0}), \quad (13)$$

[11, 12].

(11)

$$\begin{aligned}
 \vec{H}^0(Q) = & \vec{v}^{0h} \exp(ik_1(\vec{R}^{01} \cdot \vec{Q})) + \\
 & + (\vec{v}^h \dots + \vec{v}^h \dots) \exp(ik_1(\vec{R}^{02} \cdot \vec{Q})), \quad (14)
 \end{aligned}$$

(1),

[11].

3.

\vec{p}^0

$$\begin{aligned}
 & i\vec{S}\vec{p}^0 \cdot (\vec{H}(\vec{Q}_0) - \vec{H}^0(\vec{Q}_0)) = \\
 & = - \oint_S \vec{E}^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0) \cdot \vec{J}(\vec{Q}) ds_Q, \quad (15)
 \end{aligned}$$

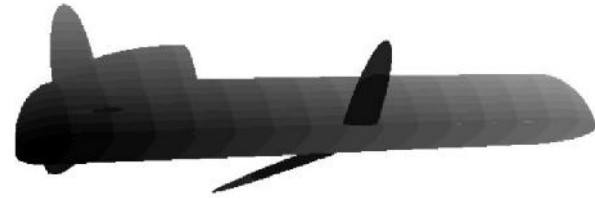
$\vec{Q}_0 \notin S, \vec{p}^0 -$

(1) - (15)

()

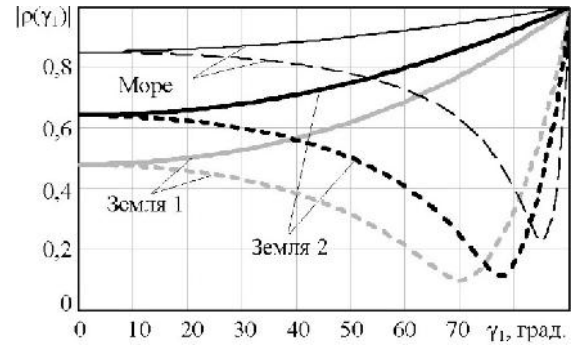
AGM86C [22].

AGM86C



.4. AGM86C

10%), [23]	
2 (1,4 / 3, 20%), [23]	17,78+i9,031
, [14]	80+i100



.5. f₀

=180

(-)

(=0

). 0,5

-0,07 3

(,)

AGM86C

f₀

=180 (λ₀ 1,667)

(.2).

. 6

(-)

12 . 4 .

20). (

() z = 50 .6

[14] [23], 1,

(6), (7)

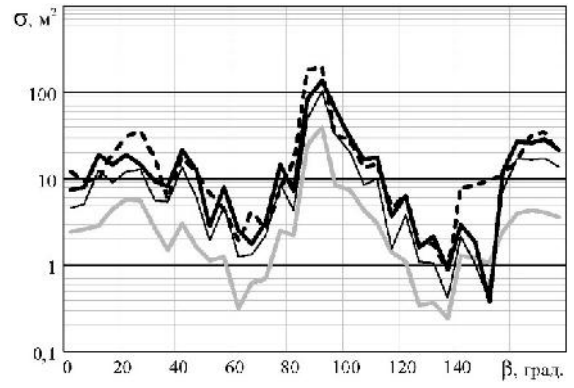
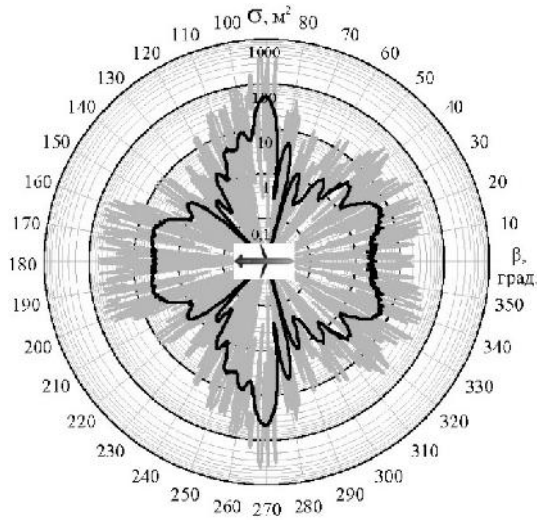
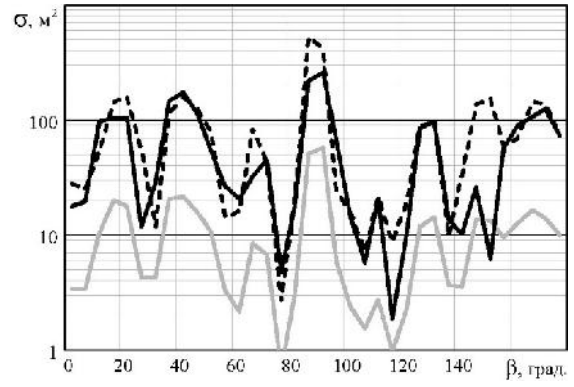
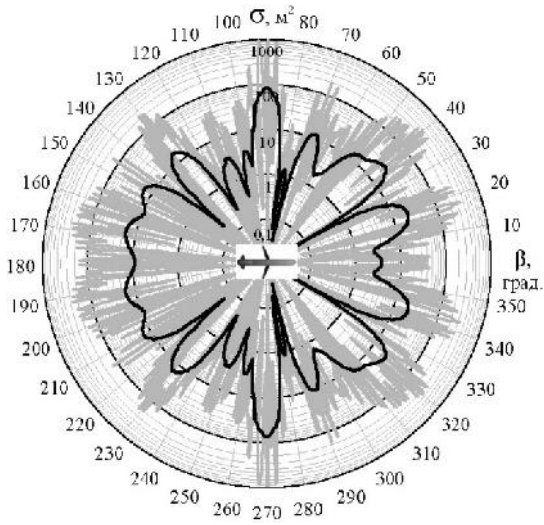
ρ ρ

.5.

1

f₀=180

	, ε₂
1 (1,2 / 3,)	6,887+i3,325



7. (- z =50
 1, - z =25
 1, - z
 =50)

6. z =50 1-3%.
 (- , - 7-18%.
 z =50 1) 2-6% 1.
 .7 5

2-6% 1. 150-155
 50 %
 1 (

(z =25)

, 90 ..

, (.5).

.8

10% (1 2)

1. $z = 50$
 $z = 0$. AGM86C

$30 \lambda_0$

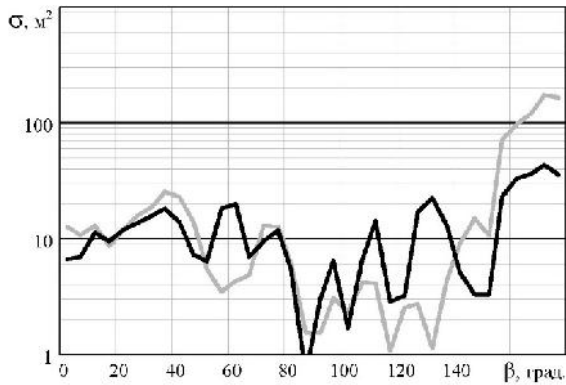
(1), (13)

(15) \vec{H}^0 (

(15) E^m

\vec{E}^m

(1), (11) (12)



8. $z = 50$

(

[24],

1. Radar Cross Section / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley; second edition. – Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.
2. Shirman Ya.D. et al. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering Recognition, Detection and Tracking / Ya.D. Shirman (ed). – Norwood, M.A.: Artech House, 2002. – 382 p.
3. Львова Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов / . . . – Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. – 232 с.
4. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике / П.Я. Уфимцев. – М.: Бином, 2007. – 366 с.
5. Gibson W.C. The Method of Moments in Electromagnetics / W.C. Gibson. – Boca Raton London New York: Chapman & Hall / Taylor & Francis Group, 2008. – 288 p.
6. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др.; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: XV С, 2009. – 468 с.
7. Sukharevsky O.I, Gorelyshev S.A., Vasilets V.A. 2012. UWB Pulse Backscattering from Objects Located near Uniform Half-Space. In J.D. Taylor et al. Ultrawideband Radar: Applications and Design. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, pp. 253-284.
8. Сухаревский О.И. Математическое моделирование радиолокационных дальностных портретов воздушных объектов / О.И. Сухаревский, В.А. Василец // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2013. Т. 56, № 11. – С. 3-15.
9. Eibert T.F. Some scattering results computed by surface-integral-equation and hybrid finite-element – boundary-integral techniques, accelerated by the multilevel fast multipole method / T.F. Eibert // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2007. – Vol. 49, No 2. – P. 61-69.
10. Моделирование характеристик рассеяния воздушных объектов резонансных размеров в метровом диапазоне волн / О.И. Сухаревский, Г.С. Залевский, С.В. Нечитайло, И.О. Сухаревский // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2010. Т. 53, № 4. – С. 51-57.
11. Zalevsky G.S. Secondary Emission Characteristics of Resonant Perfectly Conducting Objects of Simple Shape / G.S. Zalevsky, O.I. Sukharevsky // Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'13. Odessa, Ukraine. 16-20 Sept. 2013. Ukrainepp. Odessa, Ukraine. – 2013. – P. 145-147.
12. Залевский Г.С. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин

- волн / Г.С. Залевский, В.А. Василец, О.И. Сухаревский // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. Т. 13, № 1. – С. 20-28.
13. FEKO Comprehensive Electromagnetic Solutions. The Complete Antenna Design and Placement Solution [http://www.feko.info] – Режим доступ : http://www.feko.info.
14. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, В.В. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
15. Кулько В.Ф. Электромагнитное поле в слоистых проводящих средах / В.Ф. Кулько, В.Н. Михайловский. – К.: Наукова думка, 1967. – 148 с.
16. Кулько В.Ф. Электромагнитное поле в слоистых проводящих средах / В.Ф. Кулько, В.Н. Михайловский. – К.: Наукова думка, 1967. – 148 с.
17. Вычислительные методы и программирование. III сборник работ ВЦ МГУ / Под ред. В.В. Воеводина, А.Д. Горбунова, Г.П. Климова, А.Г. Свешникова. – М.: МГУ, 1965. – 546 с.
18. Вычислительные методы и программирование. III сборник работ ВЦ МГУ / Под ред. В.В. Воеводина, А.Д. Горбунова, Г.П. Климова, А.Г. Свешникова. – М.: МГУ, 1965. – 546 с.
19. Фелсен Л. Излучение и рассеяние волн. Т. 2. / Л. Фелсен, Н. Маркувиц; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 555 с.
20. Хипп Дж. Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты / Дж. Хипп // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62, № 1. – С. 122-127.
21. AGM-86C/D-CALCM [http://www.airwar.ru/weapon/kr/agm86.html]
22. Хипп Дж. Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты / Дж. Хипп // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62, № 1. – С. 122-127.
23. Хипп Дж. Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты / Дж. Хипп // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62, № 1. – С. 122-127.
24. Хипп Дж. Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты / Дж. Хипп // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62, № 1. – С. 122-127.

SECONDARY EMISSION CHARACTERISTICS OF LOW-HEIGHT RADAR TARGETS OF RESONANT SIZES

G.S. Zalevsky

Calculation technique for obtaining secondary emission characteristics of radar objects with resonant sizes accounted for influence of underlying terrain was proposed. Method is based on magnetic field integral equation solving, kernel of which is the electric force of magnetic dipole located above the boundary of dielectric media. Peculiarities of calculation of mentioned integral equation kernel are discussed. Results of calculation of secondary emission patterns of cruise missile in free space and with accounting for electromagnetic interaction with ground and sea surface are demonstrated.

Keywords: integral equation, resonant radar object, secondary emission, underlying terrain.