

УДК 621.371

*А. Г. КРАВЧЕНКО*, канд. техн. наук, *О. К. ШҚУРУПИИ*

**ОСОБЕННОСТИ ПРИЕМА АНТЕННЫМИ СИСТЕМАМИ  
СНИЖАЮЩЕГОСЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА СИГНАЛОВ  
ОТ ПОСАДОЧНЫХ РАДИОМАЯЧНЫХ СИСТЕМ**

---

К достоверности информации, принимаемой бортовой аппаратурой летательных аппаратов от радиомаячных систем посадки дециметрового диапазона волн на заключительном этапе захода на посадку предъявляются все более высокие требования. Ряд работ посвящен исследованию влияния рельефа земной поверхности и помех от пролетающих самолетов на искажения линии курса и глиссады. В статье исследуется влияние переотражений сигналов глиссадных радиомаяков от корпуса летательного аппарата (ЛА) на траекторию его снижения на конечном этапе захода на посадку. Рассматриваются дифракция электромагнитной волны, излучаемой посадочным радиомаяком, на снижающемся ЛА и анализ спектра сигнала, принятого антенной бортового приемника, с учетом как влияния подстилающей поверхности, так и динамической ситуации, которая возникает при посадке ЛА. Особенности решения задачи следующие: достаточно сложная адекватная модель летательного аппарата; учет влияния конечных физических свойств подстилающей поверхности; учет многократных переотражений волн на трассе источник излучения — ЛА — подстилающая поверхность — ЛА и т. п.

Поскольку ЛА снижается при посадке с вертикальной скоростью  $v_{\text{верт}}$ , возникают доплеровские смещения частоты сигналов, принимаемых антенной бортового приемника. Из-за различия доплеровского смещения частоты полезного и переотраженного сигналов появляются дополнительные искривления линии глиссады, обусловленные биениями разностей доплеровской частоты с гармониками частоты коммутации.

Моделируем ЛА идеально проводящими полусферой радиуса  $R$  (носовая часть ЛА), цилиндром радиуса  $R$  (фюзеляж ЛА), двумя прямоугольными пластинами со сторонами  $a, b/2$  (несущие плоскости ЛА).

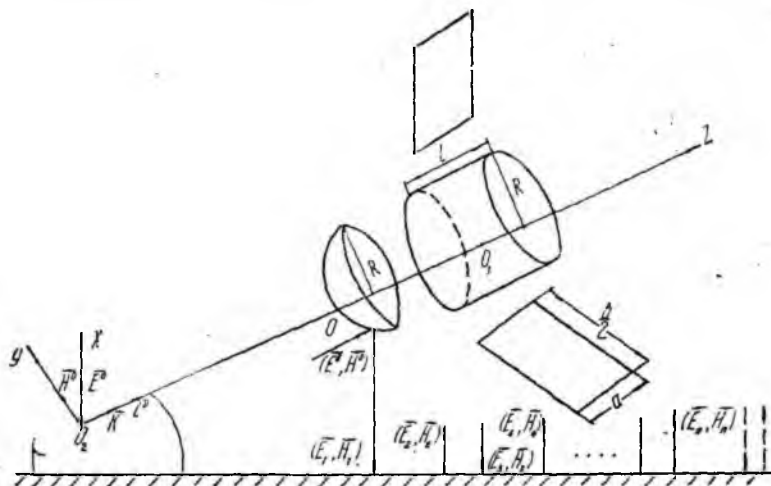


Рис. 1

На рис. 1 представлены лучевая структура дифракционной задачи и схематическое изображение модели ЛА, связанное с декартовой системой координат  $(X, Y, Z)$ . Ось  $OZ$  совпадает с осью ЛА, а ее орт сонаправлен с волновым вектором  $\vec{k}$  падающей волны. Ось  $OX$  соответствует горизонтальному направлению, а ее орт сонаправлен вектору  $\vec{E}^0$  падающей волны (горизонтальная поляризация первичной волны).

Поскольку ЛА приближается к источнику излучения с указанной выше вертикальной скоростью  $v_{\text{верт}}$ , легко получить частотную структуру принимаемых на борту сигналов (с учетом переотражений) [1]:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} \right); \\
 f_2 &= f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} + \frac{2v_{\text{верт}}}{c} \right); \\
 f_3 &= f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} + 2 \frac{2v_{\text{верт}}}{c} \right); \\
 \hline
 f_n &= f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} + (n-1) \frac{2v_{\text{верт}}}{c} \right),
 \end{aligned}$$

где  $f_0$  — частота первичной волны, а  $v_{\text{верт}}$  — значение вертикальной скорости ЛА. Задача состоит в получении оценок интенсивностей электромагнитных волн, принимаемых бортовой антенной на частотах  $f_1, f_2, f_3, \dots$ . Сложность решения обусловлена не только тем, что точный расчет поля, дифрагированного самолетом, является практически невозможным. Интенсивность отраженного от ЛА сигнала к тому же существенно зависит от длины волны, ракурса и вида поляризации. Серьезные затруднения вызывает и радиофизическое описание подстилающей поверхности. Нами выбрана так называемая отражательная трактовка [2] при расчете поля, отраженного от земли.

Поле в антенне приемника ЛА в главном приближении (без учета отражений от подстилающей поверхности). Пусть на идеально проводящее тело сложной формы падает плоская электромагнитная волна

$$\vec{E}^0 = \vec{e}^0 e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - i\omega_0 t};$$

$$\vec{H}^0 = \vec{\mathcal{H}}^0 e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - i\omega_0 t},$$

где волновой вектор  $\vec{k}_0$  имеет модуль, равный

$$|\vec{k}_0| = \frac{\omega_0}{C} = \frac{2\pi f_0}{C}.$$

Диаграмма антенны источника излучения такова, что указанная первичная волна на трассе источник излучения — антенна приемника ЛА не претерпевает переотражения от подстилающей поверхности. Очевидно, в главном приближении бортовая антенна ЛА принимает поле

$$\vec{E}_0 \{ \varepsilon^0 e^{ik_1 z}, 0, 0 \}; \vec{H}_0 \{ 0, \mathcal{H}^0 e^{ik_1 z}, 0 \}.$$

Здесь

$$k_1 = \frac{2\pi}{C} f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{C} \right),$$

$v_{\text{накл}}$  — значение наклонной (радиальной) скорости ЛА, т. е. скорости в направлении на источник излучения. Роль первой доплеровской частоты играет

$$f_{\text{Доп}} = \frac{v_{\text{накл}}}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — длина первичной волны.

Расчет поля в антенне приемника ЛА в первом приближении (с учетом однократного переотражения на трассе ЛА — подстилающая поверхность — ЛА).

Значения поля  $\{\vec{E}_1, \vec{H}_1\}$ , отраженного от самолета, определяются с помощью «носовой» высокочастотной  $\left( \frac{R}{\lambda} \gg 1 \right)$  диаграммы самолета с учетом его скорости, причем в разнесенном случае. Мы используем теорему Криспина, Гудрига, Сигеля для расчета бистатической эффективной поверхности рассеяния с помощью моностатической [3]. «Носовая» диаграмма ЛА определяется отражением плоской волны от металлической полусферы нашей модели (рис. 1). Такой подход хорошо

согласуется с экспериментальными результатами [4]. Итак, поле  $(\vec{E}_1, \vec{H}_1)$  с учетом указанных предположений описывается следующим выражением:

$$\vec{E}_1 \left\{ -\frac{\varepsilon^0 R}{2} \frac{e^{ik_2 r_1}}{r_1}; 0; 0 \right\}, \vec{H}_1 \left\{ 0; \frac{\mathcal{H}^0 R}{2r_1} e^{ik_2 r_1} \sin \alpha; -\frac{\mathcal{H}^0 R}{2} \cos \alpha \frac{e^{ik_2 r_1}}{r_1} \right\},$$

где  $\alpha$  — угол посадки ЛА;  $r_1$  — расстояние от точки стационарной фазы полусферы до текущей точки луча;

$$k_2 = \frac{2\pi}{C} f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}} + v_{\text{верт}}}{C} \right).$$

Роль второй доплеровской частоты играет

$$f_2^{\text{доп}} = \frac{v_{\text{накл}} + v_{\text{верт}}}{\lambda}.$$

Отраженная от подстилающей поверхности с волновым импедансом  $w = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$  электромагнитная волна в отражательной трактовке имеет вид

$$\vec{E}_2 \left\{ -\frac{\varepsilon^0 R}{2} \frac{w-1}{w+1} \frac{e^{ik_2(2h+y\cos\alpha+z\sin\alpha)}}{h}; 0; 0 \right\}; \vec{H}_2 \{ 0, H_{2y}, H_{2z} \},$$

где  $H_{2y} = \frac{\mathcal{H}^0 R}{2} \frac{w-1}{w+1} e^{ik_2(2h+y\cos\alpha+z\sin\alpha)} \frac{\sin\alpha}{h}$ ;  $H_{2z} = H_{2y} \cdot \text{ctg} \alpha$ ;

$\mu, \varepsilon$  — проницаемости подстилающей поверхности,

$$\mu = 1, \varepsilon = \varepsilon_1 + i \frac{4\pi\sigma}{\omega_0};$$

$r_2$  — расстояние от точки наблюдения до подстилающей поверхности;

$$k_2 = \frac{2\pi}{C} f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}} + v_{\text{верт}}}{c} \right);$$

$h$  — высота ЛА.

Таким образом, принимаемая бортовой антенной отраженная от подстилающей поверхности волна преобразуется в следующее выражение:

$$\vec{E}_2 \left\{ -\frac{\varepsilon_0 R}{2} \frac{w-1}{w+1} \kappa \frac{e^{ik_2 2h}}{h}; 0; 0 \right\}; \vec{H}_2 \left\{ 0; -\frac{\mathcal{H}^0 R}{2} \frac{w-1}{w+1} \kappa \frac{e^{ik_2 2h}}{h} \sin \alpha; \frac{\mathcal{H}^0 R}{2} \frac{w-1}{w+1} \kappa \frac{e^{ik_2 2h}}{h} \cos \alpha \right\},$$

где

$$k_3 = \frac{2\pi}{C} f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}} + 2v_{\text{верт}}}{c} \right) = \frac{2\pi}{C} f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} (1 + 2\sin \alpha) \right),$$

$\kappa$  — коэффициент ослабления приемной антенны ЛА при угле падения  $\left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right)$ .

Расчет поля в антенне приемника ЛА во втором приближении (с учетом двукратного переотражения на трассе ЛА — подстилающая поверхность — ЛА — подстилающая поверхность — ЛА).

Волна, отраженная от несущих плоскостей и цилиндрического фюзеляжа  $\{\vec{E}_3, \vec{H}_3\}$ , складывается из вклада двух плоских металлических пластин  $\{\vec{E}^n, \vec{H}^n\}$  и идеально проводящего цилиндра  $\{\vec{E}^u, \vec{H}^u\}$ . В приближении физической оптики [5] эти вклады описываются соотношениями

$$\vec{E}_3 \{E_x^u + E_x^n, E_y^u + E_y^n, E_z^u + E_z^n\}; \vec{H}_3 \{H_x^u + H_x^n, E_y^u + E_y^n, E_z^u + E_z^n\},$$

где 
$$E_x^u = \frac{iR}{2} \left[ -\frac{\epsilon_0 R \omega - 1}{2} \frac{e^{ik_3 2h}}{\omega + 1} \frac{1}{h} \right] \frac{e^{ik_3 r_2}}{r_2} e^{i \left( \frac{1}{2} + R \right) \sin \alpha (k_2 + k_3)} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{\cos \alpha \sin(k_3 e \sin \alpha)}{\pi k_3 R} \frac{e^{2ik_3 R \cos \alpha + i \frac{\pi}{4}}}{\sin \alpha}};$$

$$E_y^u = E_z^u = H_x^u = E_y^n = E_z^n = H_x^n = 0;$$

$$H_y^u = E_x \sin \alpha;$$

$$H_z^u = -E_x \cos \alpha;$$

$$H_y^n = -\frac{ib}{2\pi r_2} \cos \alpha \sin(ka \sin \alpha) e^{ik_3 r_2} \times$$

$$\times \left[ -\frac{\epsilon_0 R \omega - 1}{2} \frac{e^{ik_3 2h}}{\omega + 1} \frac{1}{h} \right] e^{i(k_2 + k_3)L \sin \alpha};$$

$$H_z^n = -H_y^n \operatorname{ctg} \alpha,$$

$$\text{где } k_4 = \frac{2\pi}{c} f_0 \left[ 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} (1 + 3 \sin \alpha) \right],$$

$r_2$  — расстояние, отсчитываемое от точки  $O$  (рис. 1) в направлении к подстилающей поверхности;  $L = |OO_1|$ . (данные формулы верны, если  $k_4 a \sin \alpha \gg 1$ , т.е. в высокочастотном случае).

Опуская выражение для переотраженной от подстилающей поверхности волны  $\{\vec{E}_4, \vec{H}_4\}$ , указываем сразу соотношения для принятой бортовой антенной волны после переотражений на трассе источник излучения — ЛА — подстилающая поверхность — ЛА — подстилающая поверхность — ЛА:  $\vec{E} \{E_x; 0; 0\}$ ;  $\vec{H} \{0; H_y; H_z\}$ . Выражение для  $E_x$  (ограничимся только им, чтобы избежать громоздких формул для  $H_y, H_z$ , которые легко можно найти из приведенного выше выражения) определяется как

$$E_x = \left\{ \frac{iR}{2} \left[ -\frac{\epsilon_0 R}{2} \frac{(\omega - 1)}{(\omega + 2)} \frac{e^{ik_3 2h}}{h} \right] \frac{e^{ik_3 h}}{h} \times \right.$$

$$\times e^{i \left( \frac{1}{2} + R \right) \sin \alpha (k_2 + k_3)} \sqrt{\frac{\cos \alpha \sin(k_3 l \sin \alpha)}{\pi k_3 R} \frac{1}{\sin \alpha}} \times$$

$$\times e^{-2ik_3 R \cos \alpha + i \frac{\pi}{4}} \frac{bl}{2\pi h} \operatorname{ctg} \alpha e^{ik_3 l} \sin(ka \sin \alpha) \times$$

$$\times \left| -\frac{\epsilon_0 R}{2} \frac{(\omega - 1)}{(\omega + 1)} \frac{e^{ik_3 2h}}{h} \right| e^{iL(k_2 + k_3) \sin \alpha} \left. \right\} e^{ihk_3 x},$$

$$\text{где } k_5 = \frac{2\pi}{c} f_0 \left( 1 + \frac{v_{\text{накл}}}{c} (1 + 4 \sin \alpha) \right).$$

Полученные результаты позволили провести большой комплекс вычислительных работ, включавших относительный вклад различных частот ( $f_1, f_2, f_3$ ) в энергию излучения, принимаемого антенной бортового навигационного приемника. Варьировались: модели ЛА (само-

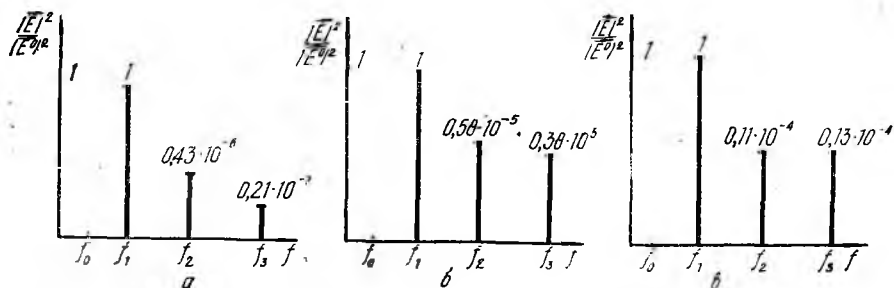


Рис. 2.

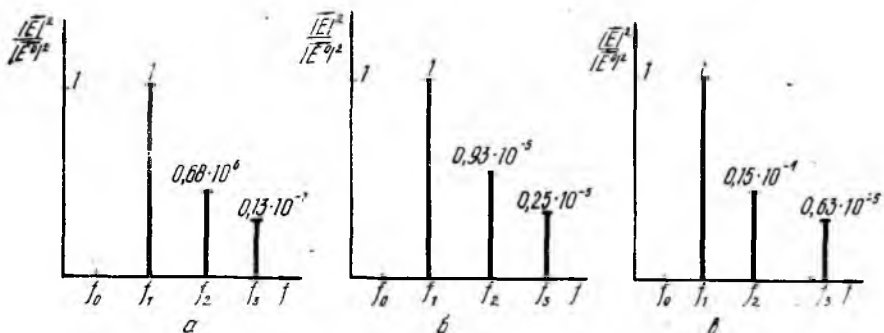


Рис. 3.

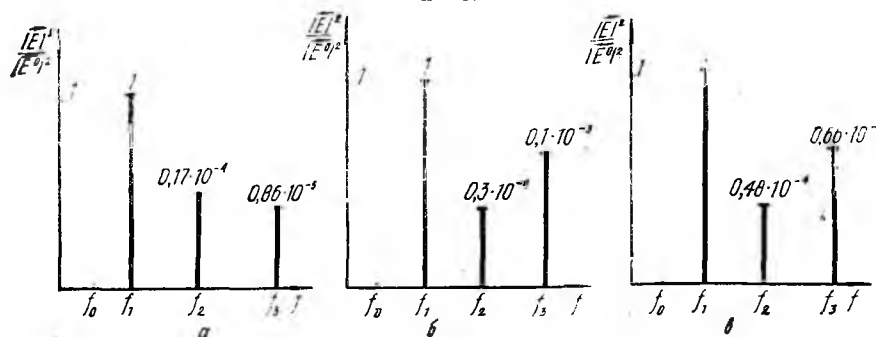


Рис. 4

леты ТУ-154, рис. 2), (ИЛ-62, рис. 3, 4, а, в); высоты  $h$  (от 60 м до 100 м); виды подстилающей поверхности (сухая земля, влажная земля, пресная вода, морская вода). На рис. 2—4 представлены для различных моделей ЛА, видов подстилающей поверхности и высот (рис. 2, 3,  $h = 100$  м) относительные вклады частот в указанную энергию,

причем частоте  $f_1$  на рисунках соответствует в обозначениях отношение

$$\frac{|\vec{E}_0|^2}{|\vec{E}^0|^2}; f_2 = \frac{|\vec{E}_2|^2}{|\vec{E}^0|^2}; f_3 = \frac{|\vec{E}|^2}{|\vec{E}^0|^2}.$$

Таким образом, интенсивности полей, возникающих из-за переотражений от подстилающей поверхности и ЛА довольно значительны. Они, как правило, тем больше, чем выше проводимость подстилающей поверхности и больше характерные размеры ЛА. При перерасчете на ошибки в определении глissады планирования из-за указанных переотражений обнаруживается, что максимальные ошибки составляют 50 % и 25 % допусков для радиомаяков 3-й и 2-й категорий соответственно с углом посадки  $2^\circ 41'$  и высотой 100 м); с уменьшением высоты  $h$  вклады частот  $f_2, f_3$  (а значит, и ошибки в определении глissады) значительно возрастают (при сравнении результатов для высот 100 м и 60 м в три — восемь раз); для хорошо проводящих поверхностей (пресная, морская вода) вклад частот с большими номерами (многократные переотражения) оказывается в ряде случаев выше вкладов частот с меньшими номерами (рис. 4). Этот эффект усиливается с уменьшением высоты; для уменьшения ошибок в определении глissады планирования ЛА настоятельно требуется совершенствование бортовых навигационных антенных систем, чтобы уменьшить (сузить) диаграмму направленности в вертикальной плоскости, т. е. свести к минимуму роль сигналов, отраженных от подстилающей поверхности в заключительной фазе захода на посадку летательных аппаратов.

**Список литературы:** 1. Небабин В. Г., Сергеев В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М., 1984. 84 с. 2. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М., 1972. 270 с. 3. Monroes E. Radar cross section handbook. New York. 1970. 788 p. 4. Кинг Р., Тай-цзунь У. Рассеяние и дифракция электромагнитных волн. М., 1962. 188 с. 5. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М., 1962. 145 с.

Поступила в редколлегию 01.06.88