

УДК 621.396.67

## ЗОНЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ШУМОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ АНТЕНН

**А.М. Сомов**, главный научный сотрудник ФГУП НИИР, д.т.н., профессор

**П.А. Титовец**, аспирант; paveltitovec@mail.ru

**С.П. Отнякин**, аспирант

**Ключевые слова:** спутниковая связь, осесимметричное зеркало, шумовая температура, зона земной поверхности.

Одним из важных параметров земных станций систем спутниковой связи является шумовая температура антенны. Наряду с коэффициентом усиления антенны, шумовой температурой маломощающего приемника и затуханием сигнала в СВЧ-тракте до его входа она определяет шумовую добротность приемной системы, влияющую на качество приема. Шумовая температура антенны во многом зависит от теплового излучения земной поверхности. Заметную роль при этом играет физическое состояние поверхности: влажность, структура, гладкость по Релею или шероховатость по Ламберту, наклон плоскости к горизонту. Как известно, сегодня в качестве антенн земных станций спутниковой связи применяются в основном крупногабаритные осесимметричные зеркальные антенны.

Расчетные отношения для шумовой температуры. Определение зоны земной поверхности под антенной, существенно

влияющей на шумовую температуру последней, представляет как теоретический, так и практический интерес. Исследования показали, что наибольшее влияние на шумовую температуру таких антенн, помимо приема главным лепестком диаграммы направленности тепловых шумов атмосферы, оказывают поля рассеяния облучателя у кромок основного зеркала и контррефлектора. Согласно принципу взаимности, эти поля в режиме приема облучателем тепловых шумов почвы повышают общую шумовую температуру.

В зависимости от физического состояния различают три основных типа земной поверхности [1]:

- гладкая;
- неровная диффузионная;
- абсолютно черная (густая трава, рыхлый снег).

Характеристикой типа поверхности земли как источника теплового излучения является действующая шумовая температура (ДШТ) [1]. При гладкой поверхности, удовлетворяющей критерию Релея, ДШТ для вертикальной поляризации теплового излучения может быть представлена в виде

$$T_B(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{4\epsilon T_0}{\pi} \int_c^\pi \frac{\sin(\theta_3) \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}}{[\epsilon \sin(\theta_3) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2} d\varphi & \text{для } \alpha < \theta \leq \pi - \alpha; \\ \frac{4\epsilon T_0}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sin(\theta_3) \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}}{[\epsilon \sin(\theta_3) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2} d\varphi & \text{для } \pi - \alpha < \theta \leq \pi, \end{cases}$$

а для горизонтальной поляризации как

$$T_T(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{4T_0}{\pi} \int_c^\pi \frac{\sin(\theta_3) \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}}{[\sin(\theta_3) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2} d\varphi & \text{для } \alpha < \theta \leq \pi - \alpha; \\ \frac{4T_0}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sin(\theta_3) \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}}{[\sin(\theta_3) + \sqrt{\epsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2} d\varphi & \text{для } \pi - \alpha < \theta \leq \pi, \end{cases}$$

где  $\sin(\theta_3) = -\sin(\theta) \left[ \frac{\sin(\alpha)}{\operatorname{tg}(\theta)} + \cos(\alpha) \cos(\varphi) \right]$ ;  $\theta_3$  – угол между направлением, в котором определяется яркостная шумовая температура земной поверхности, и плоскостью этой поверхности;  $C = \arccos \left( \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\operatorname{tg}(\theta)} \right)$  – предел интегрирования;  $\alpha$  – угол наклона антенны по отношению к горизонту;  $T_0$  – абсолютная физическая температура окружающей среды;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\theta$  и  $\varphi$  – общепринятые для расчета диаграммы направленности антенны сферические координаты с центром в фокусе зеркала.

Гладкая земная поверхность обладает отражательными свойствами. Вклад отраженных от поверхности земли шумов в ДШТ для вертикальной поляризации определяется как

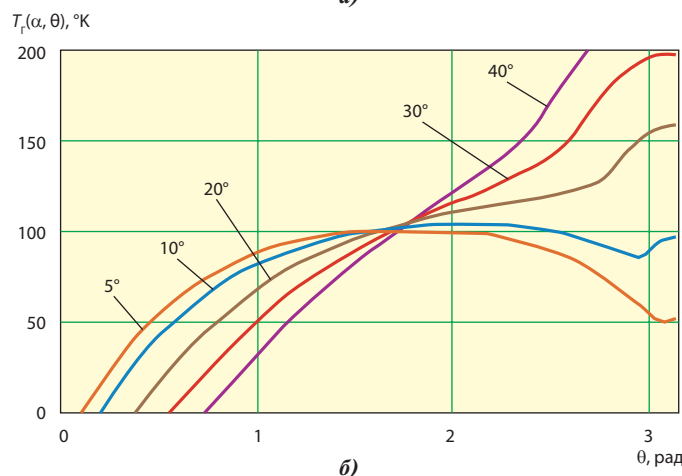
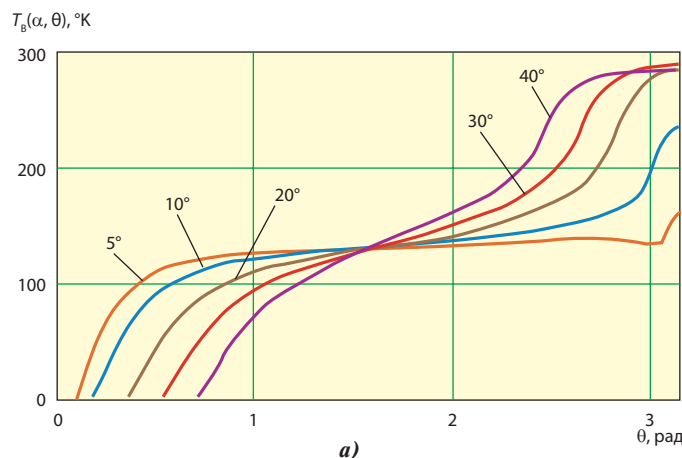


Рис. 1

$$T_{\text{ВА}}(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{T_{\text{ЗЕНИТ}}}{\pi} \int_0^\pi \frac{[\varepsilon \sin(\theta_3) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2}{c \sin(\theta_3 + p) (\varepsilon \sin(\theta_3) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)})^2} d\varphi & \text{для } \alpha < \theta \leq \pi - \alpha; \\ \frac{T_{\text{ЗЕНИТ}}}{\pi} \int_0^\pi \frac{[\varepsilon \sin(\theta_3) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2}{\sin(\theta_3 + p) (\varepsilon \sin(\theta_3) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)})^2} d\varphi & \text{для } \pi - \alpha < \theta \leq \pi, \end{cases}$$

а для горизонтальной:

$$T_{\text{ГА}}(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{T_{\text{ЗЕНИТ}}}{\pi} \int_0^\pi \frac{[\sin(\theta_3) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2}{c \sin(\theta_3 + p) (\varepsilon \sin(\theta_3) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)})^2} d\varphi & \text{для } \alpha < \theta \leq \pi - \alpha; \\ \frac{T_{\text{ЗЕНИТ}}}{\pi} \int_0^\pi \frac{[\sin(\theta_3) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)}]^2}{\sin(\theta_3 + p) (\varepsilon \sin(\theta_3) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\theta_3)})^2} d\varphi & \text{для } \pi - \alpha < \theta \leq \pi. \end{cases}$$

Программы расчета ДШТ приведены в [2]. ДШТ гладкой по Релею поверхности земли для диапазона частот Ку и вертикальной поляризации на приеме приведены на рис. 1, а и 2, а; для горизонтальной поляризации и того же диапазона частот – на рис. 1, б и 2, б при  $T_0=290^\circ\text{K}$ ,  $\varepsilon=3,95$ ,  $T_{\text{ЗЕНИТ}}=4,5^\circ\text{K}$  и различных углах наклона антенны к горизонту.

ДШТ при неровной диффузионной поверхности земли для вертикальной и горизонтальной поляризации теплового излучения рассчитывается по формуле

$$T_{\text{Д}}(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{T_0}{\pi} \int_{\alpha \cos(-\text{tg}(\alpha)\cos(\theta))}^\pi [1 + \sin(\theta)(\sin(\alpha)\cos(\theta) + \cos(\alpha)\cos(\varphi))] d\varphi & \text{для } \alpha < \theta \leq \pi - \alpha; \\ \frac{T_0}{\pi} \int_0^\pi [1 + \sin(\theta)(\sin(\alpha)\cos(\theta) + \cos(\alpha)\cos(\varphi))] d\varphi & \text{для } \pi - \alpha < \theta \leq \pi. \end{cases}$$

Зависимости ДШТ от угла  $\theta$  (при различных углах наклона антенны к горизонту) для такого случая представлены на рис. 3.

ДШТ абсолютно черной поверхности земли определяется как

$$T_{\text{ЗП}}(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{T_0}{\pi} \arccos\left(\frac{\text{tg}(\alpha)}{\text{tg}(\theta)}\right) & \text{при } \pi - \alpha > \theta \geq \alpha; \\ T_0 & \text{при } \pi > \theta \geq \pi - \alpha; \\ 0 & \text{при } \theta < \alpha. \end{cases}$$

На рис. 4 показаны зависимости ДШТ абсолютно черной поверхности земли при различных углах наклона антенны к горизонту.

**Определение границ зон существенного влияния.** Осесимметричная зеркальная антенна принимает тепловое излучение земли боковыми лепестками ДН и полями рассеяния облучателя вблизи кромок основного зеркала или контррефлектора. Вклад в шумовую температуру полей рассеяния пропорционален мощности, содержащейся в секторе главного лепестка диаграммы направленности облучателя и ее боковых лепестков за кромкой зеркала или контррефлектора и ДШТ в направлении от фокуса зеркала к земной поверхности при касании кромки.

Зона приема теплового излучения облучателем от подстилающей поверхности имеет четко выраженную границу,

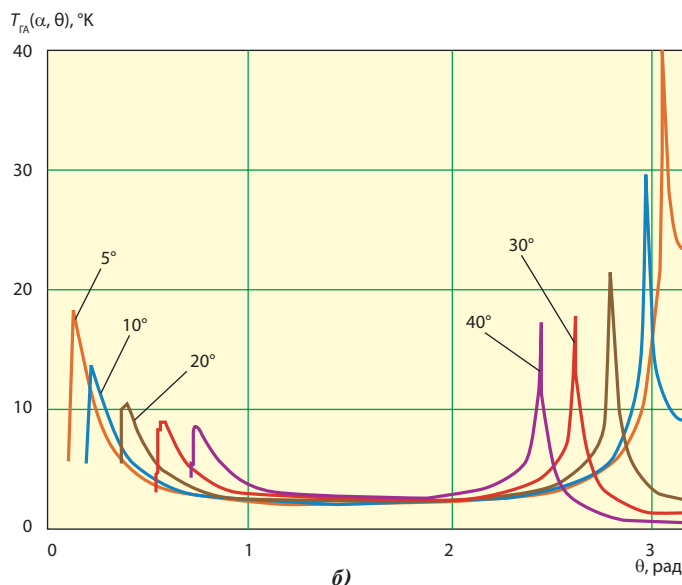
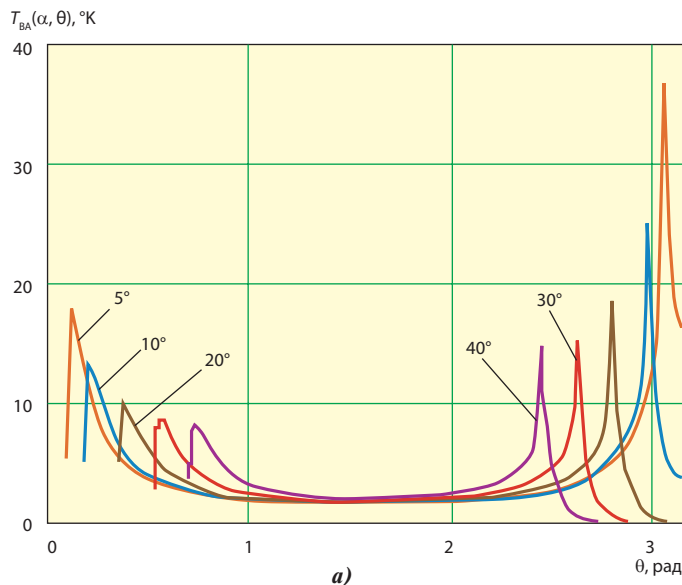


Рис. 2

зависящую от размеров зеркал, их геометрии, высоты подъема антенны над землей и угла наклона антенны к горизонту. Другая граница зоны зависит от распределения доли рассеянной облучателем мощности и в рассматриваемом случае соответствует 90% рассеянной мощности. Вычисление границ зоны земной поверхности при приеме большей части ее теплового излучения непосредственно облучателем зеркальной антенны определяет вместе с первой границей зону земной поверхности, тепловое излучение почвы которой вносит наибольший вклад в шумовую температуру антенны.

В приближении геометрической оптики задача определения этой зоны решается с использованием соотношений аналитической геометрии [3]. При этом учитывается, что:

- поверхность земли в области теплового излучения описывается уравнением горизонтальной плоскости;
- ДН облучателя имеет осесимметричную форму;
- земная поверхность находится в дальней зоне поля облучателя.

Геометрически основное зеркало или контррефлектор в плоскости раскрытия для осесимметричных антенн определяются окружностью с диаметрами основного зеркала или

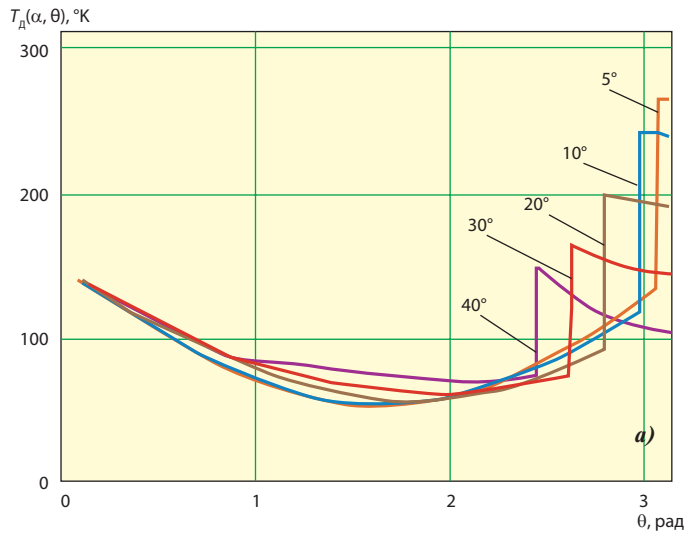


Рис. 3

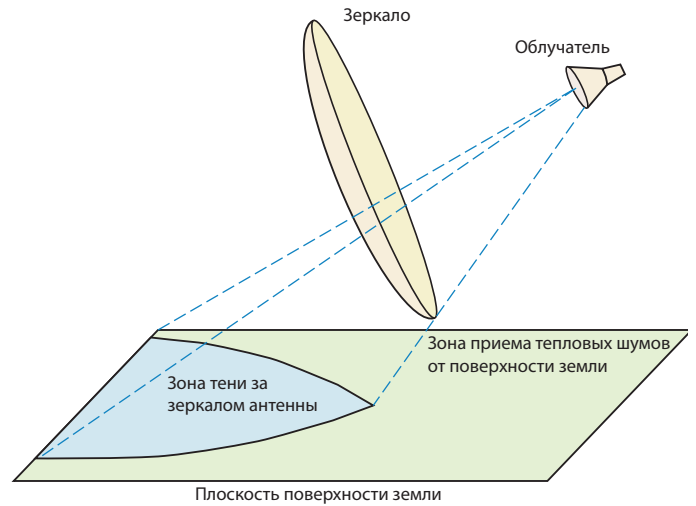


Рис. 5

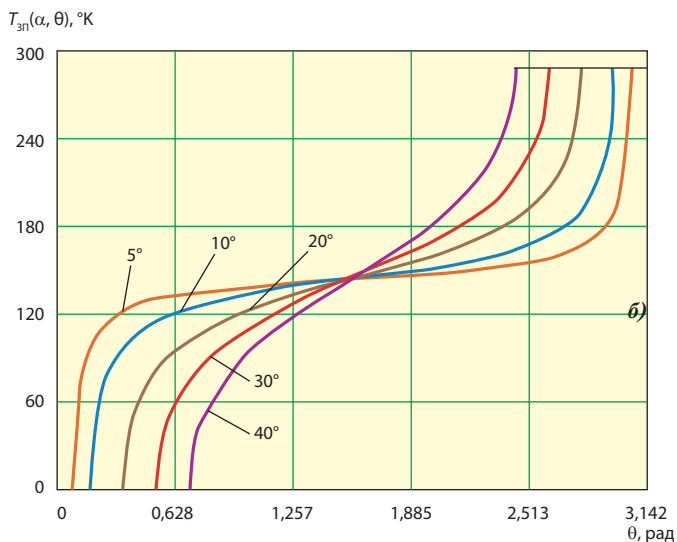


Рис. 4

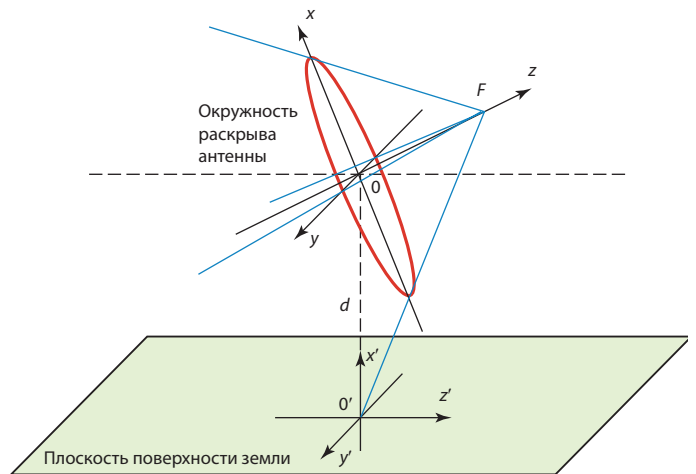


Рис. 6

контррефлектора соответственно. При данных условиях уровень поля рассеяния облучающего устройства имеет одинаковое значение по всей кромке зеркала антенны, а следовательно, фигурой, описываемой лучами, исходящими из фокуса зеркала к его кромке, является конус. Предложенные приближения и условия позволяют свести поставленную задачу к определению кривой пересечения горизонтальной плоскости поверхности земли с этим конусом лучей.

Первая граница света и тени поля рассеяния облучателя задает начало зоны приема теплового излучения облучателем и соответствует максимальному уровню поля облучателя (рис. 5). Эта граница полностью определяется геометрическими параметрами зеркала в однозеркальной или контррефлектора в двухзеркальной антенне.

Для определения первой границы используются следующие параметры:

- угловой раскрыв зеркала антенны;
- радиус зеркала;
- угол наклона антенны к горизонту для места дислокации антенны;
- высота подъема центра зеркала антенны диаметром  $d$  антенны над поверхностью земли.

Геометрическое отображение решаемой задачи представ-

лено на рис. 6.

Уравнение конуса с началом системы координат в точке  $O$ , совпадающим с центром окружности плоскости раскрыва зеркала антенны (см. рис. 6), задается уравнением направляющей

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = R_A^2; \\ z_1 = 0. \end{cases}$$

с вершиной конуса в точке  $(0, 0, (f_A - r_A))$ , где  $f$  – фокус зеркала;  $r$  – глубина зеркала.

Каноническое уравнение образующих, проходящих через вершину  $(0, 0, (f - r))$  конуса и точку  $(x_1, y_1, z_1)$  направляющей, задается равенством

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0}. \quad (1)$$

Выразив  $x_1$  и  $y_1$  из (1) и заменив  $z_1$  нулем, можно получить

$$x_1 = \frac{x(- (f - r))}{z - (f - r)}, \quad y_1 = \frac{y(- (f - r))}{z - (f - r)}.$$

Эти выражения вместе с уравнением направляющей (1) после несложных преобразований дают уравнение конуса:

$$\frac{x^2}{R_A^2} + \frac{y^2}{R_A^2} - \frac{(z - (f - r))^2}{(-(f - r))^2} = 0. \quad (2)$$

Уравнение плоскости поверхности земли в координатах  $x, y$  и  $z$  можно определить по трем известным точкам, не лежащим на одной прямой. Координаты этих точек: первая –  $(-\frac{d}{\cos(\alpha)}, 0, 0)$ ; вторая –  $(-d \cos(\alpha), 0, -d \sin(\alpha))$ ; третья –  $(-\frac{d}{\cos(\alpha)}, R_A, 0)$ .

После подстановки координат точек в определитель

$$\begin{vmatrix} x + \frac{d}{\cos(\alpha)} & y & z \\ -d \cos(\alpha) + \frac{d}{\cos(\alpha)} & 0 & -d \sin(\alpha) \\ 0 & R_A & 0 \end{vmatrix} = 0$$

уравнение плоскости в выбранной системе координат будет иметь вид

$$x + \frac{d}{\cos(\alpha)} + z \operatorname{tg}(\alpha) = 0.$$

Чтобы получить уравнение кривой пересечения конуса и плоскости  $z=0$ , координату  $x$  нужно подставить в уравнение конуса:

$$\frac{y^2}{R_A^2} - \frac{(z - (f - r))^2}{(f - r)^2} + \frac{\left(-\left(\frac{d}{\cos(\alpha)} + z \operatorname{tg}(\alpha)\right)\right)^2}{R_A^2} = 0.$$

Полученное уравнение кривой переводится в координаты плоскости поверхности земли  $x', y'$  и  $z'$  после замены координат  $x, y$  и  $z$ , согласно системе уравнений:

$$\begin{cases} y = y'; \\ z = x' \sin(\alpha) + z' \cos(\alpha) - d \sin(\alpha); \\ x = x' \cos(\alpha) + z' (\operatorname{ctg}(\alpha) \cos(\alpha) - 1) - d \cos(\alpha). \end{cases} \quad (3)$$

В качестве примера определения границ зоны рассчитана первая граница для однозеркальной антенны диаметром  $D=4,8$  м, углом раскрыва зеркала  $2\psi_0=120^\circ$  и высотой подъема центра  $d=3$  м в Ку-диапазоне частот (рис. 7).

График на рис. 7,а соответствует углу наклона антенны к горизонту  $\alpha \geq 20^\circ$ , на рис. 7,б – углу  $\alpha=30^\circ$ . Сплошная линия определяет первую границу в координатах поверхности земли с учетом угла наклона антенны к горизонту, а пунктиром обозначена граница в координатах с началом в центре плоскости раскрыва основного зеркала антенны. При уменьшении угла наклона антенны к горизонту уменьшается разность между границами в расчетных координатах. Кривые по осям  $y'$  и  $z'$  ограничены дальностью прямой видимости:

$$D_{\text{ПВ}} = 3,57 \sqrt{(d + f_A \sin(\alpha))}.$$

Уравнение, определяющее вторую границу зоны, может быть получено путем замены радиуса антенны в формуле (2) выражением  $R = R_A + \Delta R$ , где  $\Delta R$  – радиус, задающий вторую границу зоны:

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} - \frac{(z - (f - r))^2}{(-(f - r))^2} = 0. \quad (4)$$

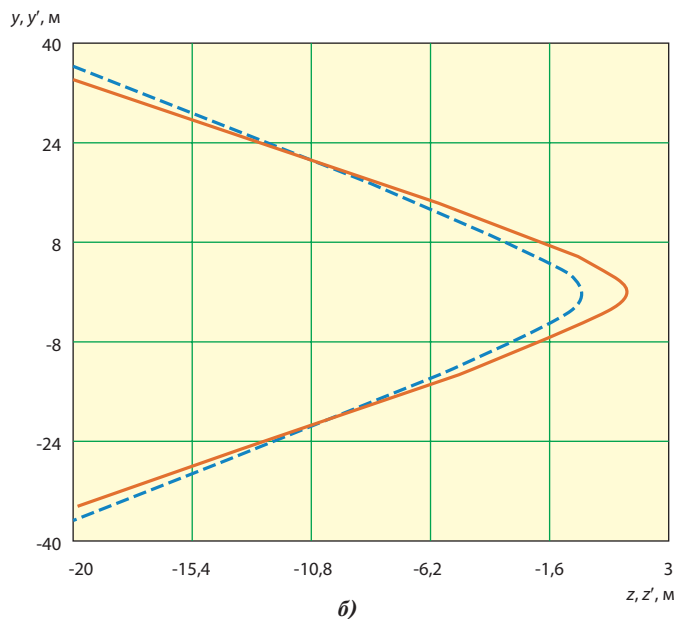
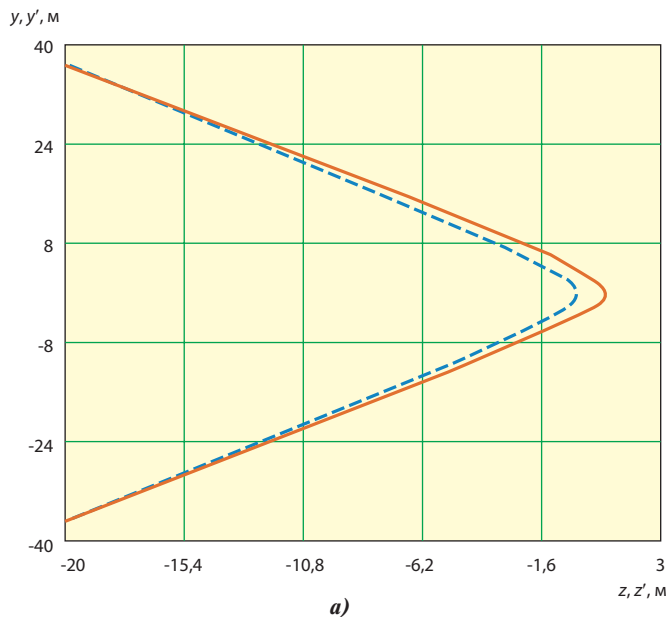


Рис. 7

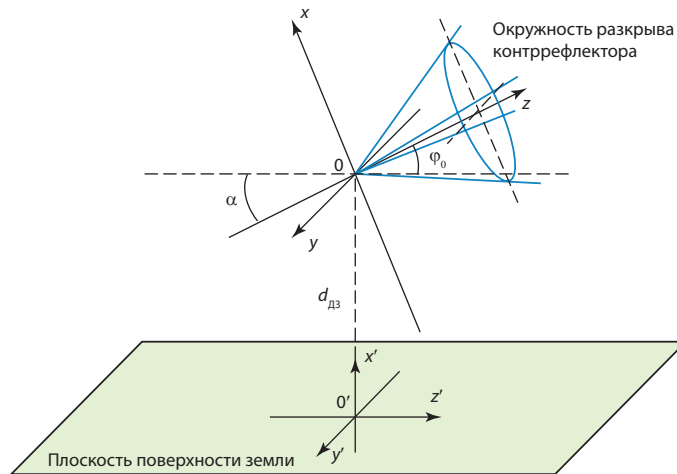
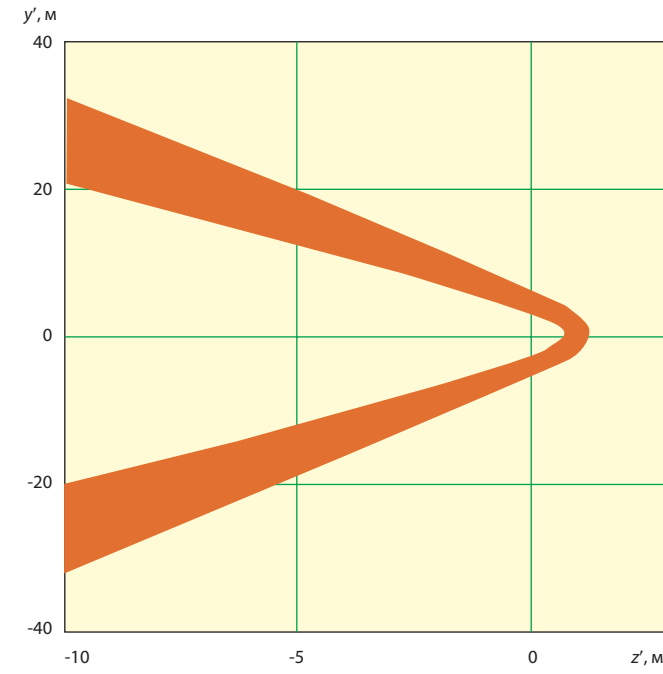
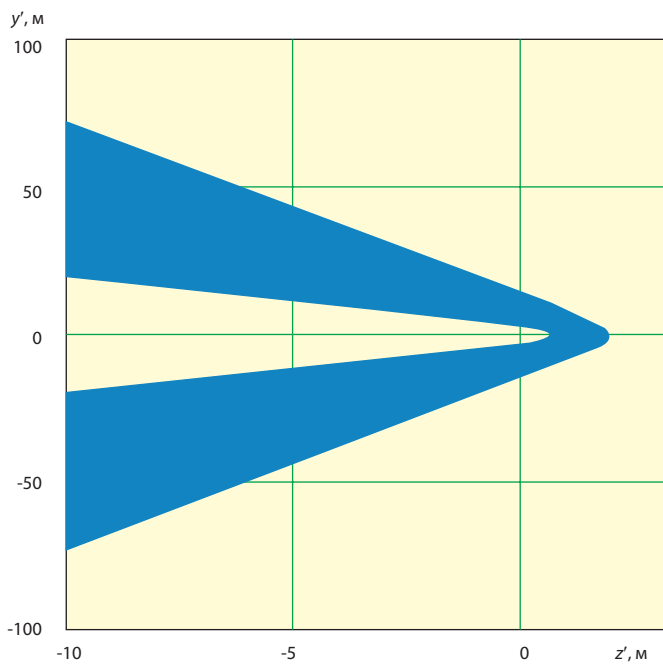


Рис. 8



a)



б)

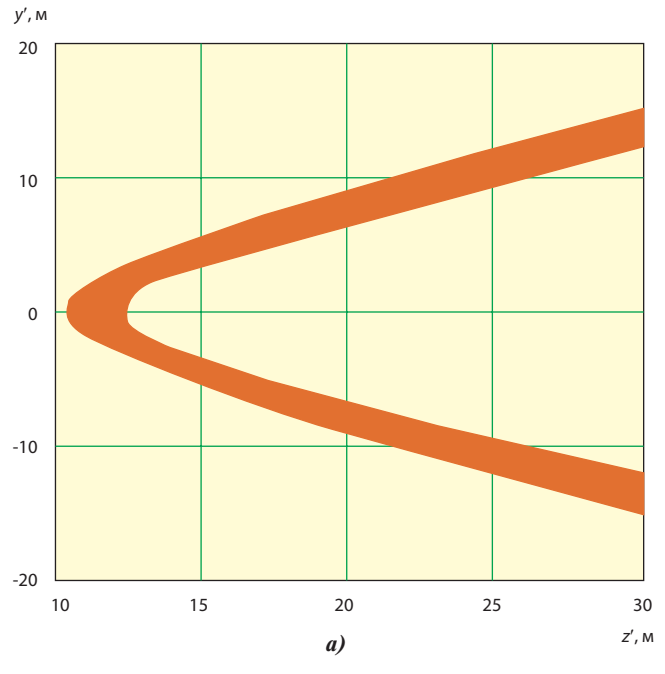
Рис. 9

Уравнение кривой пересечения плоскости поверхности земли и конуса (4) задается выражением

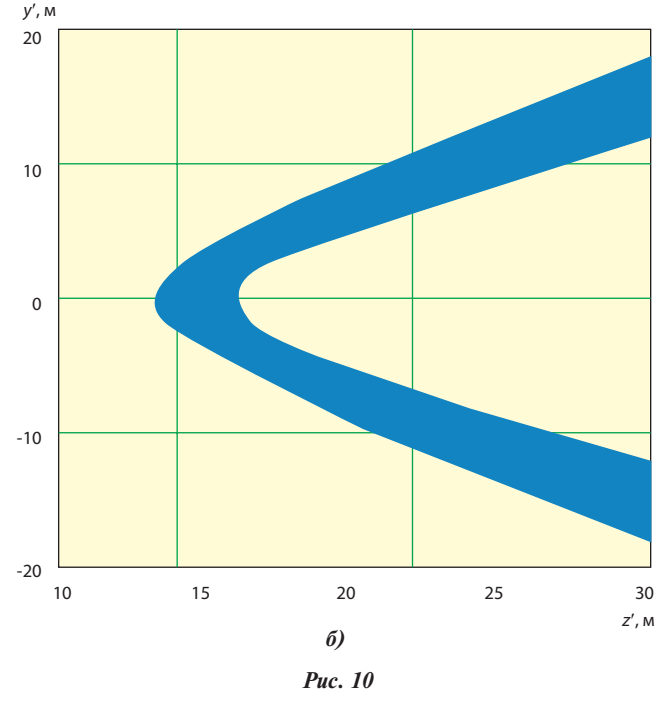
$$\frac{y^2}{R^2} - \frac{(z - (f - r))^2}{(f - r)^2} + \frac{\left(-\left(\frac{d}{\cos(\alpha)} + z \operatorname{tg}(\alpha)\right)\right)^2}{R^2} = 0.$$

Преобразовав координаты с помощью системы уравнений (3), можно получить уравнение второй условной границы зоны в координатах поверхности земли.

Радиус, задающий вторую условную границу зоны, может быть определен с учетом угла рассеяния облучателя  $\delta$ , в пределах которого принимается основная часть теплового излучения подстилающей поверхности. Увеличение радиуса,



a)



б)

Рис. 10

задающего вторую границу зоны, приводит к ограничению угла поля рассеяния величиной  $\frac{\pi}{2} - \psi_0$ . Поле рассеяния облучателя осесимметричной зеркальной антенны может не ограничиться углом  $\frac{\pi}{2} - \psi_0$  и продолжаться до угла  $(\pi - \alpha - \psi_0)$ . Уравнение конуса, определяющего вторую условную границу зоны на поверхности земли в пределах углов  $\delta$  от  $\frac{\pi}{2} - \psi_0$  до  $(\pi - \alpha - \psi_0)$ , выглядит как

$$\frac{x^2}{(R')^2} + \frac{y^2}{(R')^2} - \frac{(z - (f - r))^2}{(f - r)^2} = 0,$$

где  $R'$  – радиус конуса, направленного в сторону, противоположную раскрытию зеркала антенны. Он находится из соотношения  $R' = (f - r) \operatorname{tg}(\pi - \psi_0 - \delta)$  при  $\frac{\pi}{2} < \delta \leq (\pi + \alpha)$ .

Теория конических сечений описывает четыре возмож-

ных вида кривых при пересечении конуса плоскостью – окружность, эллипс, парабола и гипербола. Форма кривой зависит от угла раствора конуса и угла наклона плоскости к оси конуса. Согласно теории конических сечений, получаемые кривые границ зоны приема теплового излучения подстилающей плоскости однозеркальных антенн классифицируются в зависимости от соотношения угла наклона антенны к горизонту и суммы углового полураскрыва антенны и конечного угла поля рассеяния облучателя:  $0 \leq \alpha < (\psi_0 + \delta)$  – гипербола;  $\alpha = \psi_0 + \delta$  – парабола;  $(\psi_0 + \delta) < \alpha < (\pi / 2)$  – эллипс;  $\alpha = \pi / 2$  – окружность.

В случае двухзеркальных антенн основное поле перелива находится за кромкой контррефлектора и для упрощения расчетов начало координат следует расположить в центре раскрыва облучателя (рис. 8).

Уравнение конуса, определяющее первую границу зоны поля рассеяния у контррефлектора, задается радиусом  $R_k$  и угловым полураскрывом  $\varphi_0$  контррефлектора:

$$\frac{x^2}{R_k^2} + \frac{y^2}{R_k^2} - \frac{z^2}{(R_k \operatorname{ctg}(\varphi_0))^2} = 0.$$

В предложенной системе координат уравнение плоскости земли может быть представлено в виде

$$x + \frac{d_{\text{дз}}}{\cos(\alpha)} + z \operatorname{tg}(\alpha) = 0,$$

где  $d_{\text{дз}}$  – высота подъема двухзеркальной антенны относительно центра раскрыва облучателя. Уравнение кривых границы зоны для двухзеркальной антенны имеет вид

$$\frac{y^2}{R_k^2} - \frac{z^2}{(R_k \operatorname{ctg}(\varphi_0))^2} + \frac{\left( -\left( \frac{d_{\text{дз}}}{\cos(\alpha)} + z \operatorname{tg}(\alpha) \right) \right)^2}{R_k^2} = 0$$

и

$$\frac{y^2}{R^2} - \frac{z^2}{(R_k \operatorname{ctg}(\varphi_0))^2} + \frac{\left( -\left( \frac{d_{\text{дз}}}{\cos(\alpha)} + z \operatorname{tg}(\alpha) \right) \right)^2}{R^2} = 0,$$

где радиус, задающий вторую границу зоны, определяется формулой

$$R = \begin{cases} R_k (1 + \operatorname{ctg}(\varphi_0) \operatorname{tg}(\varphi_0 + \delta)) & \text{при } 0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} - \varphi_0; \\ R_k \operatorname{ctg}(\varphi_0) \operatorname{tg}(\pi - \varphi_0 - \delta) & \text{при } \frac{\pi}{2} - \varphi_0 < \delta \leq \pi - \alpha - \varphi_0. \end{cases}$$

Полученные уравнения преобразуются в координаты поверхности земли с помощью системы уравнений

$$\begin{cases} y = y'; \\ z = x' \sin(\alpha) + z' \cos(\alpha) - d_{\text{дз}} \sin(\alpha); \\ x = x' \cos(\alpha) + z' (\cos(\alpha) \operatorname{ctg}(\alpha) - 1) - d_{\text{дз}} \cos(\alpha). \end{cases}$$

При расчете зоны учитывается, что основное зеркало двухзеркальной антенны принимает тепловые шумы из заднего полупространства антенны, и границы зоны обретают форму гиперболы.

**Пример расчета границ зон.** В качестве примера рассчитаны границы зоны приема тепловых шумов на плоской поверхности земли для однозеркальной антенны диаметром 4,8 м (рис. 9). Поле рассеяния ограничивается параметрами  $\delta=9,7^\circ$  (рис. 9,а) и  $\delta=20,9^\circ$  (рис. 9,б), высота подъема 3 м, угол наклона антенны к горизонту  $20^\circ$ .

Для сравнения рассчитаны границы зоны тепловых помех земной поверхности 7-метровой двухзеркальной антенны для подъема центра зеркала  $d_{\text{дз}}=5$  м, угла наклона антенны к горизонту  $\alpha=1^\circ$  и углов  $\delta=4,3^\circ$  (рис. 10,а) и  $\delta=8,4^\circ$  (рис. 10,б). Двухзеркальная антенна имеет следующие параметры: диаметр контррефлектора 1,1 м, угловой полураскрыв основного зеркала  $\psi_0=75^\circ$ , угловой полураскрыв контррефлектора  $\varphi_0=25^\circ$ , м

**Таким образом, получены алгоритмы расчета зоны земной поверхности, физическое состояние которой существенно влияет на величину приема тепловых шумов и на шумовую температуру зеркальных антенн земных станций спутниковой связи.**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сомов А.М. Метод фрагментации для расчета шумовой температуры антенн. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 208 с.
2. Сомов А.М. Расчет антенн земных станций спутниковой связи. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011. – 304 с.
3. Привалов И.И. Аналитическая геометрия. – М.: Наука, 1966. – 272 с.

Получено 10.10.10