УДК 621.396

В.К. ВОЛОСЮК, К.Н. ЛЁВКИНА, В.М. ВЕЛАСКО ЭРРЕРА

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Исследуется статистическая связь основных параметров, анализируемых при активном и пассивном дистанционном зондировании поверхностей – коэффициента отражения и яркостной температуры. Приводятся теоретические выкладки и результаты анализа для нескольких, наиболее часто встречающихся типов поверхностей.

дистанционное зондирование, коэффициент рассеяния, яркостная температура, коэффициент корреляции, статистические характеристики

Введение

Необходимость определения статистической связи моделей яркостной температуры радиотеплового излучения и коэффициента отражения возникает при решении различных задач дистанционного зондирования. Это задачи пересчета характеристик теплового излучения в характеристики отраженных сигналов и обратно, задачи комплексирования [1] результатов измерений радиометрическими и активными радиолокационными датчиками, а также интерпретации результатов измерений комплексными методами активной и пассивной радиолокации, и в частности, задачи измерения диэлектрических и геометрических характеристик подстилающих поверхностей [2]. При этом важнейшей характеристикой совместно регистрируемых сигналов является коэффициент их взаимной корреляции.

1. Формулирование проблемы

При определении статистической связи между отраженными и радиотепловыми сигналами возникают некоторые трудности. Они обусловлены тем, что поле собственного излучения земной поверхности является некоррелированным с полем отраженных или рассеянных радиоволн. При проведении же практических исследований наблюдается наличие связи между этими полями и вопрос о степени их корреляции остается актуальным. В данной работе задача решена в предположении, что рассматривается только одна реализация статистически неровной поверхности и состояние поверхности во времени не меняется.

2. Решение проблемы

При решении задачи определения статистической связи в качестве сравниваемых характеристик отраженных сигналов и теплового излучения (от одних и тех же участков поверхности ΔS) возьмем коэффициент обратного отражения (рассеяния) и яркостную температуру.

Считаем, что элементы разрешения активной и пассивной РЛС одинаковы, а величины и параметров поверхности и термодинамическая температура T_0 в пределах рассматриваемой площадки постоянны. Тогда коэффициент отражения по мощности за период гармонического сигнала определяется следующим выражением [2]:

$$K = \frac{\left| \int\limits_{\Delta S} \dot{F}(\vec{r}) e^{-j\vec{q}_{\perp}\vec{r}} d\vec{r} \right|^2}{\Delta S \cos\theta_i}, \qquad (1)$$

где $\dot{F}(\vec{r})$ – случайная функция координат подстилающей поверхности $\vec{r}=(x,y)$, порожденная граничными условиями и представляющая собой распределение комплексного коэффициента отражения на площади ΔS, $\left(\left\langle \dot{F}(\vec{r})\right\rangle = 0\right)$; $\vec{q}_\perp = (q_x, q_y)$ – горизонтальная проекция вектора рассеяния

$$\vec{q} = k\left(\vec{\vartheta}_i - \vec{\vartheta}_s\right), \tag{2}$$

где $\vec{\vartheta}_i, \vec{\vartheta}_s$ – единичные векторы в направлениях падения и рассеяния волн (рис. 1);

$$\vec{q}_x = k(\sin\theta_i - \sin\theta_s \sin\varphi_s);$$

$$\vec{q}_y = -k(\sin\theta_s \sin\varphi_s). \tag{3}$$

Тогда яркостная температура, определяемая из условия энергетического баланса [3], равна

$$T_я = (1-K_u)T_0 = \left[1 - \frac{1}{4\pi}\int_\Omega K(\Omega)d\Omega\right]T_0 =$$

$$\left[1 - \frac{1}{4\pi}\int_\Omega \frac{\dot{F}(\vec{r})\exp[-j\vec{q}_\perp \vec{r}]d\vec{r}}{\Delta S\cos\theta_i}d\Omega\right]T_0, \tag{4}$$

где Ω – текущее значение телесного угла, определяемое координатами θ_s, φ_s; $d\Omega = \sin\theta_s d\theta_s d\varphi_s$ – элемент телесного угла.

В качестве меры статистической связи коэффициента отражения и яркостной температуры одного и того же участка поверхности примем коэффициент корреляции (термодинамическую температуру считаем постоянной неслучайной величиной) [1]:

$$\rho = -\frac{\left\langle \overset{\circ}{K}\overset{\circ}{T}_я\right\rangle}{\sigma_K \sigma_{T_я}} = \frac{\overset{\circ}{\gamma}_i \overset{\circ}{\gamma}_u}{\sigma_{\gamma_i}\sigma_{\gamma_u}} = \frac{\langle\gamma_i\gamma_u\rangle - \langle\gamma_i\rangle\langle\gamma_u\rangle}{\sqrt{\left[\left\langle\gamma_i^2\right\rangle - \langle\gamma_i\rangle^2\right]\left[\left\langle\gamma_u^2\right\rangle - \langle\gamma_u\rangle^2\right]}}, \tag{5}$$

где $\overset{\circ}{K}, \overset{\circ}{T}_я$ – центрированные значения коэффициента отражения и яркостной температуры, а $\sigma_K, \sigma_{T_я}$ – их дисперсии. Величины γ_i, γ_u (коэффициент обратного рассеяния и интегральный коэффициент рассеяния) равны:

$$\gamma_i = \left|\int_{\Delta S} \dot{F}(\vec{r})\exp[-j\vec{q}_{\perp s}\vec{r}]\,d\vec{r}\right|^2; \tag{6}$$

$$\gamma_u = \frac{1}{4\pi}\left|\int_\Omega \gamma_i[\vec{q}_{\perp s}]\,d\Omega\right|^2. \tag{7}$$

Для обратного рассеяния $\gamma_i = \gamma[\vec{q}_{\perp i}]$. При этом $\theta_s = \theta_i$, $\varphi_s = \pi$, $\vec{q}_{\perp i} = \vec{q}_{\perp s}$. В бистатическом случае величину γ_i будем обозначать как

$$\gamma_s = \gamma(\Omega) = \gamma(\vec{q}_{\perp s}).$$

Кроме того, введем следующее обозначение

$$\dot{v}(\vec{q}_\perp) = \int_{\Delta S}\dot{F}(\vec{r})\exp[-j\vec{q}_\perp \vec{r}]d\vec{r}. \tag{8}$$

Тогда $$\gamma(\vec{q}_T) = |\dot{v}(\vec{q}_\perp)|^2. \tag{9}$$

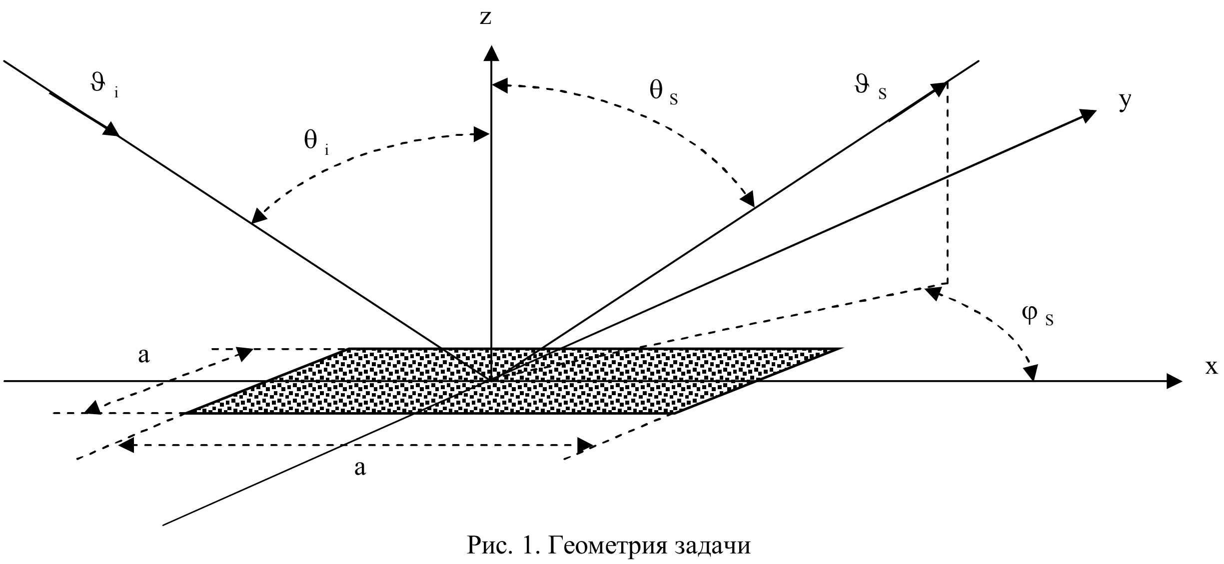

Рис. 1. Геометрия задачи

Для расчета коэффициента корреляции запишем статистические характеристики, входящих в его состав величин.

Среднее значение коэффициента γ_i равно

$$\langle\gamma\rangle = \left\langle\left|\dot{\nu}(\vec{q}_\perp)\right|^2\right\rangle \approx \sigma^0 \Delta S\,. \tag{10}$$

Здесь $\sigma^0(\vec{q}_\perp)$ - эффективное сечение рассеяния. В общем случае эффективное сечение рассеяния является бистатическим и является функцией телесного угла $\Omega = \Omega(\theta_s, \varphi_s)$. В частном случае $\varphi_s = \pi$, $\theta_s = \theta_i$, т.е. в случае обратного рассеяния эффективное сечение является удельной ЭПР поверхности ΔS.

Второй момент γ_i равен

$$\left\langle\gamma_S^2\right\rangle = 2\left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp S})\right]^2[\Delta S]^2, \left\langle\gamma_i^2\right\rangle = 2\left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp i})\right]^2[\Delta S]^2\,. \tag{11}$$

Среднее значение величины γ_u равно

$$\begin{aligned}\langle\gamma_u(\theta_i)\rangle &= \frac{1}{4\pi}\int\limits_\Omega \left\langle\left|\dot{\nu}(\theta_i, \vec{q}_{\perp S})\right|^2\right\rangle d\Omega = \\ &= \frac{1}{4\pi}\Delta S \int\limits_\Omega \sigma^0(\theta_i, \vec{q}_{\perp S})\,d\Omega\,.\end{aligned} \tag{12}$$

Второй момент величины γ_u равен

$$\begin{aligned}\left\langle\gamma_u^2\right\rangle = \left(\frac{\Delta S}{(4\pi)^2}\int\limits_\Omega \sigma^0(\vec{q}_{\perp S})d\Omega\right)^2 + \frac{\Delta S}{16k^2}\int\limits_\Omega \frac{\left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp S})\right]^2}{\operatorname{Cos}\theta_S(\vec{q}_{\perp S1})}d\Omega + \\ \frac{\Delta S}{16k^2}\int\limits_\Omega \frac{\left|\dot{\Sigma}^0(\vec{q}_{\perp S})\right|^2}{\cos\theta_S(-\vec{q}_{\perp S1})}d\Omega\,,\end{aligned} \tag{13}$$

где

$$\begin{aligned}&\left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp S})\right]^2 = \\ &= \left\{\left[\sigma^0_{xx}(\vec{q}_{\perp S1}) + \sigma^0_{yy}(\vec{q}_{\perp S1})\right] \pm \left[2\operatorname{Im}\dot{\sigma}^0_{xy}(\vec{q}_{\perp S1})\right]\right\}^2;\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}&\left|\dot{\Sigma}^0(\vec{q}_{\perp S})\right|^2 = \\ &= \left\{\left[\sigma^0_{xx}(\vec{q}_{\perp S1}) + \sigma^0_{yy}(\vec{q}_{\perp S1})\right]^2 + \left[2\operatorname{Re}\dot{\sigma}^0_{xy}(\vec{q}_{\perp S1})\right]^2\right\}.\end{aligned} \tag{15}$$

Для дальнейшего анализа целесообразно выделить три случая [4].

1. В общем случае оценку величин, входящих в корреляционную функцию сделать трудно, т.к. в литературе нет данных о соотношениях между $\sigma^0_{xx}(\vec{q}_{\perp i}), \sigma^0_{yy}(\vec{q}_{\perp i}), \sigma^0_{xy}(\vec{q}_{\perp i})$, просто считают $\beta \neq 0$. При этом учтено, что, как правило, на практике коэффициент корреляции неоднородностей статистически неровной поверхности значительно меньше линейных размеров рассматриваемой площадки.

2. При рассмотрении наиболее часто встречающихся на практике случаев ($\lambda << h(\vec{r})$, где $h(\vec{r})$ – высота неровностей рельефа) можно предположить, что аргумент функции $\dot{F}(\vec{r})$ распределен равномерно в интервале от 0 до 2π, а ее модуль – по закону Релея. При этом:

$$\sigma^0(\vec{q}_{\perp S}) = 2\left[\sigma^0_{xx}(\vec{q}_{\perp S}) \pm \left|\dot{\sigma}^0_{xy}(\vec{q}_{\perp S})\right|\right]; \tag{16}$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy};\ \operatorname{Re}\dot{\sigma}_{xy} = 0;\ \beta = 0\,.$$

3. В частном, хорошо известном случае, мелкомасштабной поверхности флуктуационная часть функции $\dot{F}(\vec{r})$ равна $jf(\vec{\alpha})h(\vec{r})$. При вещественной диэлектрической проницаемости ($\vec{\alpha}$ – вектор диэлектрических и геометрических параметров поверхности) эта величина является чисто мнимой. Тогда:

$$B_{xx} = B_{xy} = B_{yx} = 0;\quad \sigma^0(\vec{q}_{\perp S}) = \sigma^0_{yy}(\vec{q}_{\perp S});$$

$$\beta = 1; \tag{17}$$

$$\left(\left\langle|\dot{\nu}|^2\right\rangle\right)^2 = \left[\sigma^0_{yy}(\vec{q}_{\perp S})\right]^2[\Delta S]^2 = \left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp S})\right]^2[\Delta S]^2\,. \tag{18}$$

Запишем статистические характеристики для приведенных выше случаев.

1. Статистические характеристики обратного рассеяния. Случаи 1, 2, 3 ($\theta_i \neq 0$):

$$\langle\gamma_i\rangle = \sigma^0(\vec{q}_{\perp i})\Delta S\,; \tag{19}$$

$$\langle\gamma_i\rangle^2 = 2\left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp i})\right]^2(\Delta S)^2\,. \tag{20}$$

Дисперсия

$$\sigma^2_{\gamma_i} = \left\langle{\gamma_i}^2\right\rangle - \left(\langle\gamma_i\rangle\right)^2 = (\Delta S)^2\left[\sigma^0(\vec{q}_{\perp i})\right]^2; \tag{21}$$

случай 3 (мелкомасштабная поверхность), $\theta_i = 0$:

$$\langle\gamma_i\rangle^2 = 3\left[\sigma^0(0)\right]^2(\Delta S)^2\,. \tag{22}$$

Дисперсия

$$\sigma^2_{\gamma_i} = 2\left[\sigma^0(0)\right]^2(\Delta S)^2\,. \tag{23}$$

2. Статистические характеристики для интегрального коэффициента рассеяния:

$$\left\langle \gamma_u^2 \right\rangle = \left(\frac{\Delta S}{(4\pi)^2} \int_\Omega \sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right) d\Omega \right)^2 + \\ + \frac{\Delta S}{16k^2} \int_\Omega \frac{\left[\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right)\right]^2}{\cos\theta_S\left(\vec{q}_{\perp S1}\right)} d\Omega + \\ + \frac{\Delta S}{16k^2} \int_\Omega \frac{\beta^2\left[\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right)\right]^2}{\cos\theta_S\left(-\vec{q}_{\perp S1}\right)} d\Omega; \tag{24}$$

$$\sigma_{\gamma_u}^2 = \frac{\Delta S}{4k^2} \int_\Omega \left[\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right) d\Omega\right]^2 \left[\frac{1}{\cos\theta_S\left(\vec{q}_{\perp S1}\right)} + \\ + \frac{\beta^2}{\cos\theta_S\left(\vec{q}_{\perp S1}\right)} \right] d\Omega. \tag{25}$$

3. Смешанные моменты.

Начальный второй момент

$$\left\langle \gamma\gamma_u \right\rangle = (\Delta S)^2 \sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right) \int_\Omega \sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right) d\Omega + \\ + \frac{\Delta S \pi}{4k^2 \cos\theta_i} \left[\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)\right]^2 + \\ + \frac{\Delta S \pi}{4k^2 \sqrt{1 - 4\sin^2\theta_i}} \beta^2 \left[\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)\right]^2. \tag{26}$$

Центральный второй момент

$$\left\langle \mathring{\gamma}\mathring{\gamma}_u \right\rangle = \frac{\Delta S \pi \left[\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)\right]^2}{4k^2} \left[\frac{1}{\cos\theta_i} + \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - 4\sin^2\theta_i}} \right]. \tag{27}$$

В выражениях (24) и (25) интегрирование второго слагаемого осуществляется по части верхней полусферы. В выражениях (26, 27) вторые слагаемые существуют лишь при углах $\theta_i \le 30^\circ$.

Коэффициент корреляции ρ равен ($0 < \theta_i \le 30^\circ$, случаи 1, 2, 3):

$$\rho_1 = -\frac{\left\langle \mathring{\gamma}\mathring{\gamma}_u \right\rangle}{\sigma_\gamma \sigma_{\gamma_u}} = \\ = \left(\frac{1}{\cos\theta_i} + \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - 4\sin^2\theta_i}} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{k^2 \Delta S}{\pi^2}} \right)^{-1} \Bigg/ \\ \Bigg/ \sqrt{\int_\Omega \left[\frac{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right)}{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)} \right]^2 \left[\frac{1}{\cos\theta_i\left(\vec{q}_{\perp S}\right)} + \frac{\beta^2}{\cos\theta_i\left(-\vec{q}_{\perp S}\right)} \right]}, \tag{28}$$

при $\theta_i > 30^\circ$ 2-е слагаемое в числителе отсутствует.

В наиболее распространенном случае (случай 2), $\beta = 0$ при всех значениях θ_i:

$$\rho_2 = -\left(\frac{k^2 \Delta S Cos^2\theta_i}{\pi^2} \times \\ \times \int_\Omega \left[\frac{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right)}{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)} \right]^2 \frac{1}{\cos\theta_S\left(\vec{q}_{\perp S}\right)} d\Omega \right)^{-0,5} \tag{29}$$

Для случая 3 (мелкомасштабная поверхность, $\beta = 1, \cos\theta_S\left(\vec{q}_{\perp S}\right) \approx \cos\theta_S\left(-\vec{q}_{\perp S}\right)$):

при $\theta_i > 30^\circ$

$$\rho_3 = -\left(\frac{k^2 \Delta S \cos\theta_i}{\pi^2} \int_\Omega \left[\frac{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right)}{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)} \right]^2 d\Omega \right)^{-0,5}; \tag{30}$$

при $0 < \theta_i \le 30^\circ$

$$\rho_4 = -\frac{\dfrac{1}{\cos\theta_i} - \dfrac{\beta^2}{\sqrt{1 - 4\sin^2\theta_i}}}{\sqrt{\dfrac{k^2 \Delta S}{\pi^2} \displaystyle\int_\Omega \left[\frac{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp S}\right)}{\sigma^0\left(\vec{q}_{\perp i}\right)} \right]^2 d\Omega}}; \tag{31}$$

при $\theta_i = 0$

$$\rho_5 = \rho_4 / \sqrt{2}. \tag{32}$$

Примечание: коэффициенты ρ_3, ρ_4, ρ_5 найдены лишь для диффузных составляющих рассеянного поля без учета зеркальных компонентов.

Заключение

По результатам проведенного анализа можно сделать определенные выводы. В связи с тем, что электромагнитное поле, обусловленное тепловым излучением поверхности, является некогерентным, в качестве сравниваемых характеристик отраженных сигналов и теплового излучения (от одних и тех же участков поверхности ΔS) взяты коэффициент обратного отражения (рассеяния) и яркостная температура, причем последняя выражается через интегральный коэффициент отражения, определяемый путем интегрирования бистатического коэффициента рассеяния по верхней полусфере. Задача определения коэффициента корреляции сводится к расчету различных смешанных статистических моментов четвертого порядка и их интегрированию по телесным углам верхней полусферы. Полученные коэффициенты пропорциональны малому параметру $\frac{\lambda}{\sqrt{\Delta S}}$ и в большинстве случаев значительно меньше единицы. Заметное увеличение коэффициента корреляции наблюдается лишь при узких индикатрисах $\sigma^0(\vec{q}_{\perp S})$ и выполнении условия $\vec{q}_{\perp i} = 0$. Эти коэффициенты зависят от углов падения, а также от вида поверхности. В самом общем случае для различных поверхностей дать численную оценку коэффициентов корреляции трудно, так как в литературе отсутствуют данные о величинах $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ (о величине β). В частных случаях, но весьма распространенных на практике (высота неровностей $h(\vec{r}) >> \lambda, \beta = 0$), величина коэффициента корреляции полностью определяется углом визирования θ_i, длиной волны λ, размерами площади ΔS, бистатическим эффективным сечением рассеяния $\sigma^0(\vec{q}_{\perp S})$ и удельной ЭПР $\sigma^0(\vec{q}_{\perp Si})$. Наблюдается существенное различие в коэффициентах корреляции при меньшем и превышающем 30^0, а также при лоцировании в надир, т.е. корреляционная связь между яркостной температурой и коэффициентом отражения при анализе одной реализации статистически неровной поверхности отсутствует. Однако на практике наблюдается наличие корреляции между элементами изображений, полученных с помощью активной и пассивной РЛС от одних и тех же участков поверхности. Это объясняется тем, что регистрируемые сигналы пропорциональны усредненной по времени и пространству мощности или усредненному модулю комплексной амплитуды, причем интервал усреднения определяется техническими характеристиками используемых технических средств. Случайность отраженных и радиотепловых сигналов непосредственно связана со случайным характером неровностей поверхности и ее электрофизических параметров. Если изображение формируется по характеристикам средней мощности принимаемых радиотепловых и отраженных сигналов, то при определении корреляционной связи между этими колебаниями усреднение должно рассматриваться как условное, причем осуществляться оно должно либо по времени или по времени и части случайных параметров поверхности (другая часть параметров определена и постоянна). В дальнейшей работе необходим анализ и исследование именно такого случая.

Литература

1. Волосюк В. К. Комплексирование активных и пассивных радиолокационных систем дистанционного зондирования: Учебное пособие. – Х.: ХАИ, 2001. – 43 с.

2. Волосюк В. К. Оптимизация радиотехнических измерений электрофизических параметров и статистических характеристик природных сред при активном аэрокосмическом дистанционном зондировании: Учебное пособие. – Х.: ХАИ, 2000. – 93 с.

3. Волосюк В. К. Теоретические основы пассивного дистанционного зондирования природных сред с аэрокосмических летательных аппаратов: Учебное пособие. – Х.: ХАИ, 1997. – 84 с.

4. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника.– М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.

Поступила в редакцию 1.11.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Военный университет Воздушных Сил, Харьков.