

## Влияние случайных погрешностей формирования полей на точность измерения коэффициентов прохождения и отражения материалов и покрытий

Е.С. Емельянов , О.Е. Кирьянов, В.А. Понькин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия»  
394064, Россия, г. Воронеж,  
ул. Старых Большевиков, 54а

**Аннотация – Обоснование.** Одной из характерных особенностей современного этапа развития военной техники является широкое применение специальных конструкционных материалов и покрытий, обладающих заданными свойствами взаимодействия с электромагнитными полями, которые подлежат измерению в процессе производства и эксплуатации. Чаще всего измерения проводятся в квазиплоских полях облучения и приема. При этом закономерности влияния случайных погрешностей формирования плоских полей на точность измерения характеристик специальных конструкционных материалов и покрытий изучены недостаточно. **Цель.** Целью настоящей работы является установление количественных закономерностей влияния случайных фазовых погрешностей формирования плоских полей на ошибки измерения коэффициентов прохождения и отражения материалов и покрытий. **Методы.** Исследования влияния случайных фазовых погрешностей формирования плоских полей облучения и приема сигналов на точность измерения коэффициентов прохождения и отражения объектов проведены с использованием методов математического моделирования и статистической радиотехники. **Результаты.** Получены расчетные соотношения для оценки величины ошибок измерения коэффициентов прохождения и отражения. **Заключение.** При небольших погрешностях и малом интервале пространственной корреляции ошибки измеряемых средних значений коэффициентов прохождения и отражения пропорциональны погрешностям формирования полей облучения и приема и относительной величине интервала пространственной корреляции. Для обеспечения измерений коэффициентов прохождения и отражения с точностью 15 % при малом интервале пространственной корреляции фазовая погрешность формирования полей не должна превышать 22 град.

**Ключевые слова** – случайные погрешности формирования плоского поля; точность измерения; коэффициент прохождения; коэффициент отражения.

### Введение

Одной из характерных особенностей современного этапа развития военной техники является широкое применение специальных конструкционных материалов и покрытий, обладающих заданными свойствами взаимодействия с электромагнитными полями (ЭМП), которые подлежат измерению в процессе производства и эксплуатации.

При этом наиболее актуальными являются вопросы создания средств измерения и экспериментального исследования коэффициентов прохождения (КП) и отражения (КО) материалов и покрытий, рассмотрению которых посвящена обширная литература [1–6].

Вопросы точности измерения КП и КО применительно к наиболее перспективному методу радиоволнового контроля в свободном пространстве наиболее полно рассмотрены в [6].

Для оценки информационных возможностей средств измерения КП и КО в [6] разработана система математических моделей, позволяющих оценивать влияние на точность измерения техни-

ческих характеристик составных элементов и измерительных устройств.

Вместе с тем общие закономерности влияния случайных погрешностей формирования плоских полей на точность измерения КП и КО изучены недостаточно.

Целью настоящей статьи является установление количественных закономерностей влияния случайных фазовых погрешностей формирования плоских полей на ошибки измерения КП и КО.

### 1. Постановка задачи

Расчет КП и КО осуществляется на основе результатов прямых измерений амплитуды и фазы, рассеянных ЭМП по формулам [6]:

$$|K_{np}| = \frac{A_{np}}{A_{над}}, \quad \varphi_{K_{np}} = \varphi_{np} - \varphi_{над}, \quad (1)$$

$$|K_{omp}| = \frac{A_{omp}}{A_{над}}, \quad \varphi_{K_{omp}} = \varphi_{omp} - \varphi_{над}, \quad (2)$$

где  $|K_{np}|$ ,  $|K_{omp}|$  и  $\varphi_{K_{np}}$ ,  $\varphi_{K_{omp}}$  – модули и фазы амплитудных коэффициентов прохождения и от-

ражения материала;  $A_{np}$ ,  $A_{отр}$ ,  $A_{над}$  и  $\varphi_{np}$ ,  $\varphi_{отр}$ ,  $\varphi_{над}$  – амплитуды и фазы прошедшего отраженного и падающего ЭМП.

В действительности, в соответствии с принципами построения измерительных устройств, формирование и регистрация полей ЭМП предполагает использование в системах радиоволнового контроля (РВК) протяженных (реальных или синтезированных) антенн, размеры которых значительно превосходят длину волны. Поэтому наиболее реалистические модели для определения КП и КО можно представить в виде интегралов, описывающих интегрирование соответствующих ЭМП по области измерения  $S_{узм}$  (т. е. по области облучения или по области приема ЭМП. Ввиду однообразия формул, описывающих прошедшее, отраженное и падающее поля, ограничимся записью формул для одного из них. Например, комплексная амплитуда падающего поля может быть записана в виде

$$\dot{E}_{над0} = \int_{S_{узм}} A_{над}(\rho) e^{j\psi(\rho)} d\rho, \quad \rho = \{x, y\}. \quad (3)$$

Подобным образом могут быть представлены прошедшее и отраженное ЭМП.

Далее, если ограничиться рассмотрением влияния случайных фазовых погрешностей, выражение (3) можно записать как

$$\dot{E} = \int_{S_{узм}} A(\rho) e^{j\psi(\rho)} e^{jk\varphi(\rho)} d\rho, \quad (4)$$

где  $A(\rho)$  и  $\varphi(\rho)$  – амплитудное и фазовое распределение поля в отсутствие ошибок формирования ЭМП;  $\varphi(\rho)$  – случайная функция распределения фазы;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны.

При наличии случайных погрешностей формирования КП и КО являются случайными функциями и для их анализа необходимо применение их статистических характеристик. Поэтому далее рассмотрим их подробно.

## 2. Вычисление среднего значения

Оценим среднее значение КП по мощности

$$\langle K_{np\ m} \rangle = \frac{\langle |\dot{E}_{np}|^2 \rangle}{\langle |\dot{E}_{над}|^2 \rangle}, \quad (5)$$

где  $\langle |\dot{E}_{np}|^2 \rangle$  и  $\langle |\dot{E}_{над}|^2 \rangle$  можно представить в однообразном виде. Например,

$$\langle |\dot{E}_{np}|^2 \rangle = \iint_{S_{узм}} A_{np}(\rho_1) A_{np}(\rho_2) e^{j[\varphi(\rho_1) - \varphi(\rho_2)]} \times \left\langle e^{jk[\varphi_{np}(\rho_1) - \varphi_{np}(\rho_2)]} \right\rangle d\rho_1 d\rho_2. \quad (6)$$

Выражение в  $\langle \rangle$  скобках является характеристической функцией [7]:

$$\left\langle e^{jk[\varphi_{np}(\rho_1) - \varphi_{np}(\rho_2)]} \right\rangle = e^{-k^2 \sigma_{np}^2 [1 - r_{np}(\Delta\rho)]}, \quad (7)$$

где  $r_{np}(\rho)$  – коэффициент корреляции случайных флюктуаций фазы принимаемого прошедшего поля,  $\sigma_{np}^2$  – дисперсия флюктуаций,  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ .

Количественные оценки средних значений КП и КО можно получить лишь в крайних случаях.

Так, в случае коррелированных флюктуаций, когда интервал корреляции значительно превышает размеры области измерений

$$\Delta_{np}^2 \gg S_{узм}, \quad (8)$$

$r(\Delta\rho)$  в (7) можно положить равным единице:

$$r(\Delta\rho) = 1. \quad (9)$$

В этом случае из (5), (7), (9) следует, что при наличии коррелированных случайных фазовых погрешностей формирования прошедшего, отраженного и падающего ЭМП средние значения КП и КО по мощности совпадают со своими значениями КП и КО, измеренными при отсутствии случайных погрешностей:

$$\langle K_{np\ m} \rangle = K_{np\ m}, \quad \langle K_{ко\ m} \rangle = K_{ко\ m}. \quad (10)$$

В случае когда интервал корреляции мал:

$$\Delta_{np}^2 \ll S_{узм}, \quad (11)$$

оценки средних значений КП и КО можно получить при небольших фазовых погрешностях:

$$k^2 \sigma_{np}^2 \ll 1. \quad (12)$$

Это позволяет характеристическую функцию (7) разложить в ряд, ограничиться двумя первыми членами ряда.

При принятых ограничениях интеграл (6) можно приближенно представить в виде

$$\langle |\dot{E}_{np}|^2 \rangle \approx (1 - k^2 \sigma_{np}^2) |\dot{E}_{np\ o}|^2 + k^2 \sigma_{np}^2 \iint_{S_{узм}} A_{np}(\rho_1) A_{np}(\rho_2) \times e^{j[\psi(\rho_1) - \psi(\rho_2)]} r_{np}(\Delta\rho) d\rho_1 d\rho_2. \quad (13)$$

Далее, если предположить, что в интеграле (13)  $r(\Delta\rho)$  является «быстрой» функцией с миниму-

мом в точке  $\Delta \mathbf{p} = 0$ , то (13) с учетом (7) можно приближенно преобразовать как

$$\left\langle \left| \dot{E}_{np} \right|^2 \right\rangle \approx (1 - k^2 \sigma_{np}^2) \left| \dot{E}_{npo} \right|^2 + k^2 \sigma_{np}^2 \int_{S_{изм}} A_{np}^2(\rho) d\rho \int_{-\infty}^{\infty} r_{np}(\rho) d\rho. \quad (14)$$

Например, при гауссовом коэффициенте корреляции

$$r_{np}(\Delta \mathbf{p}) = e^{-\frac{(\Delta \mathbf{p})^2}{2\Delta_{np}^2}} \quad (15)$$

интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{|\rho|^2}{2\Delta_{np}^2}} d\rho = 2\pi \Delta_{np}^2. \quad (16)$$

Таким образом, при принятых допущениях (11), (12) квадрат модуля полей облучения и приема измеряемого объекта приближенно можно представить в виде

$$\left\langle \left| \dot{E}_i \right|^2 \right\rangle \approx \left| \dot{E}_{io} \right|^2 \left\{ 1 - k^2 \sigma_{i\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{i\phi}^2 \frac{\Delta_i^2}{S_{изм}} \right\}, \quad (17)$$

$i = 1, 2, 3$ ,

где индексы  $i = 1, 2, 3$  относятся к характеристикам прошедшего, отраженного и падающего ЭМП.

Из полученных соотношений следует, что при симметричных характеристиках измерительной установки  $\sigma_i^2 = \sigma_j^2$  и  $\Delta_i^2 = \Delta_j^2$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  средние значения КП и КО по мощности при наличии небольших случайных фазовых погрешностей формирования измерительных полей (11), (12) совпадают со своими значениями КП и КО, измеренными при отсутствии случайных погрешностей.

### 3. Оценка ошибок измерения КП и КО

Измеряемые коэффициенты прохождения и отражения  $\bar{y}$  при влиянии случайных погрешностей формирования полей по существу являются отношением двух случайных величин  $x_1$  и  $x_2$ :

$$\bar{y} = \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2}.$$

Полагая, что случайные величины  $x_1$  и  $x_2$  являются независимыми, погрешность оценки их отношения, в соответствии с теорией переноса ошибок [8], равна

$$D[\bar{y}] = \frac{\bar{x}_1^2}{\bar{x}_2^2} \left[ \frac{D[x_1]}{\bar{x}_1^2} + \frac{D[x_2]}{\bar{x}_2^2} \right]. \quad (18)$$

С учетом вышеприведенных вычислений, наиболее просто можно оценить дисперсии ошибок измерения КП и КО по амплитуде (1), (2).

Заметим, что первый множитель в (18) является вычисленным выше при вычислении соответствующих коэффициентов прохождения и отражения по мощности. Дисперсии  $D[x_1]$  и  $D[x_2]$  в (18) могут быть определены в результате вычислений, подобных вышеприведенным при выводе формул (14)–(17).

Так, выражения для оценки дисперсии измеренных прошедшего и отраженного полей

$$D[\dot{E}_{np}] \approx \left| \dot{E}_{npo} \right|^2 2\pi k^2 \sigma_{np\phi}^2 \frac{\Delta_{np}^2}{S_{изм}}, \quad (19)$$

$$D[\dot{E}_{omp}] \approx \left| \dot{E}_{ompo} \right|^2 2\pi k^2 \sigma_{omp\phi}^2 \frac{\Delta_{omp}^2}{S_{изм}}. \quad (20)$$

Таким образом, объединяя результаты вышеприведенных вычислений, получим:

$$D[K_{np}] \approx \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \left| \dot{E}_{npo} \right|^2 \left[ 1 - k^2 \sigma_{np\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{np\phi}^2 \frac{\Delta_{np}^2}{S_{изм}} \right] \\ & \approx \frac{\left| \dot{E}_{npo} \right|^2 \left[ 1 - k^2 \sigma_{np\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{np\phi}^2 \frac{\Delta_{np}^2}{S_{изм}} \right]}{\left| \dot{E}_{надo} \right|^2 \left[ 1 - k^2 \sigma_{над\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{над\phi}^2 \frac{\Delta_{над}^2}{S_{изм}} \right]} \times \\ & \times \left\{ \frac{2\pi k^2 \sigma_{np\phi}^2 \frac{\Delta_{np}^2}{S_{изм}}}{\left[ 1 - k^2 \sigma_{np\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{np\phi}^2 \frac{\Delta_{np}^2}{S_{изм}} \right]} + \right. \\ & \left. + \frac{2\pi k^2 \sigma_{над\phi}^2 \frac{\Delta_{над}^2}{S_{изм}}}{\left[ 1 - k^2 \sigma_{над\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{над\phi}^2 \frac{\Delta_{над}^2}{S_{изм}} \right]} \right\}, \end{aligned}$$

$$D[K_{omp}] \approx \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \left| \dot{E}_{ompo} \right|^2 \left[ 1 - k^2 \sigma_{omp\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{omp\phi}^2 \frac{\Delta_{omp}^2}{S_{изм}} \right] \\ & \approx \frac{\left| \dot{E}_{ompo} \right|^2 \left[ 1 - k^2 \sigma_{omp\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{omp\phi}^2 \frac{\Delta_{omp}^2}{S_{изм}} \right]}{\left| \dot{E}_{над} \right|^2 \left[ 1 - k^2 \sigma_{над\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{над\phi}^2 \frac{\Delta_{над}^2}{S_{изм}} \right]} \times \\ & \times \left\{ \frac{2\pi k^2 \sigma_{omp\phi}^2 \frac{\Delta_{omp}^2}{S_{изм}}}{\left[ 1 - k^2 \sigma_{omp\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{omp\phi}^2 \frac{\Delta_{omp}^2}{S_{изм}} \right]} + \right. \end{aligned}$$

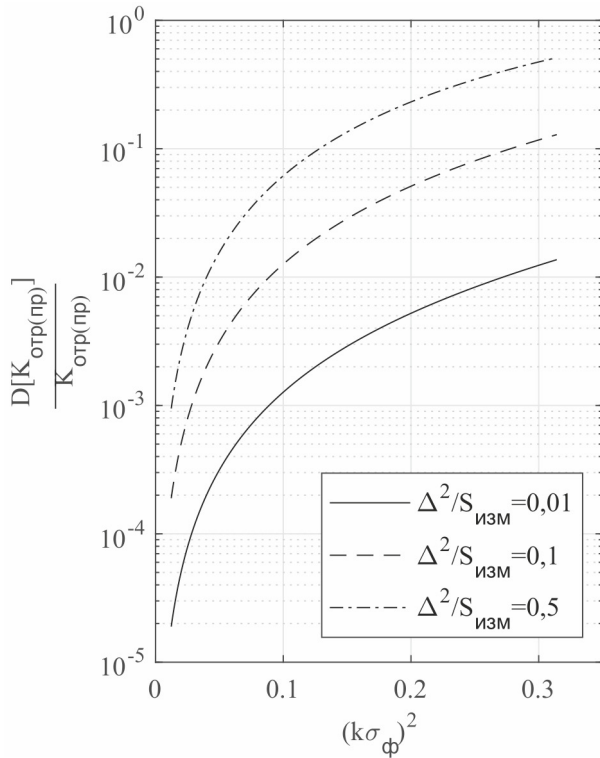


Рис. Зависимости относительных ошибок измерения коэффициентов пропускания  $K_{пр}$  и отражения  $K_{отр}$   
 Fig. Dependences of relative measurement errors of transmission  $K_{пр}$  and reflection coefficients  $K_{отр}$

$$+ \left[ \frac{2\pi k^2 \sigma_{над\phi}^2 \frac{\Delta_{над}^2}{S_{изм}}}{1 - k^2 \sigma_{над\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{над\phi}^2 \frac{\Delta_{над}^2}{S_{изм}}} \right].$$

Упрощение громоздких выражений (21), (22) возможно при равных статистических характеристиках случайных флуктуаций прошедшего, отраженного и падающего ЭМП:

$$\sigma_{пр}^2 = \sigma_{отр}^2 = \sigma_{над}^2, \quad \Delta_{пр}^2 = \Delta_{отр}^2 = \Delta_{над}^2. \quad (23)$$

После простых преобразований (21), (22) с учетом (23) получим:

$$D[K_{пр}] \approx 4\pi K_{пр} M \frac{k^2 \sigma_{\phi}^2 \frac{\Delta_{\phi}^2}{S_{изм}}}{1 - k^2 \sigma_{\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{\phi}^2 \frac{\Delta_{\phi}^2}{S_{изм}}}, \quad (24)$$

$$D[K_{отр}] \approx 4\pi K_{отр} M \frac{k^2 \sigma_{\phi}^2 \frac{\Delta_{\phi}^2}{S_{изм}}}{1 - k^2 \sigma_{\phi}^2 + 2\pi k^2 \sigma_{\phi}^2 \frac{\Delta_{\phi}^2}{S_{изм}}}. \quad (25)$$

Графики зависимости относительных ошибок измерения коэффициентов пропускания  $K_{пр}$  и отражения  $K_{отр}$  приведены на рисунке. Из приведенных графиков следует, что для обеспечения измерений КП и КО с точностью 15÷20 % и при малом интервале пространственной корреляции случайных флуктуаций измеренных полей ( $\Delta_{\phi}^2 / S_{изм} \leq 0,1$ ) фазовая погрешность формирования полей не должна превышать  $\left(\frac{\pi}{8} \div \frac{\pi}{10}\right)$  рад.

### Заключение

1. При наличии случайных погрешностей формирования полей облучения и приема электромагнитных полей возникают ошибки измерения средних значений коэффициентов прохождения (КП) и отражения (КО) объектов. Однако если случайные фазовые флуктуации полей описываются гауссовским законом распределения, являются центрированными и имеют равные дисперсии ( $\sigma_{пр}^2 = \sigma_{отр}^2 = \sigma_{над}^2$ ) и интервалы пространственной корреляции ( $\Delta_{пр\phi} = \Delta_{отр\phi} = \Delta_{над\phi}$ ), то измеряемые средние значения коэффициентов КП и КО при наличии случайных погрешностей совпадают со значениями КП и КО, измеренными при их отсутствии.

2. Вычисленные (при небольших погрешностях  $k^2 \sigma_{\phi}^2 \ll 1$  и малом интервале пространственной корреляции  $\Delta_{\phi}^2 < S_{изм}$ ) ошибки измеряемых средних значений КП и КО пропорциональны погрешностям формирования полей облучения и приема и относительной величине интервала пространственной корреляции (24), (25).

Для обеспечения измерений КП и КО с точностью 15÷20 % при малом интервале пространственной корреляции фазовая погрешность формирования полей не должна превышать  $\left(\frac{\pi}{8} \div \frac{\pi}{10}\right)$  рад.

### Список литературы

- ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Издательство стандартов, 1979. 12 с.
- Кириянов О.Е., Понькин В.А. Вопросы повышения информационных возможностей систем радиоволнового контроля радиотехнических характеристик слоистых объектов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, № 4. С. 62–69.
- Матвеев В.И. Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
- Микроволновая термовлагодетрия / П.А. Федюнин [и др.]; под общ. ред. П.А. Федюнина. М.: Машиностроение 1, 2004. 208 с.

5. Многопараметровые измерения структур сверхвысокочастотными волноводными методами / Д.А. Усанов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 3. С. 12–17. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7012>
6. Беляев В.В., Кирьянов О.Е., Понькин В.А. Радиолокационные антенные и радиофизические измерения: монография. Воронеж: Научная книга, 2013. 319 с.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
8. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.

### Информация об авторах

**Емельянов Евгений Сергеевич**, 1982 г. р., кандидат технических наук, заместитель начальника отдела НИИИ (РЭБ) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* разработка методов измерения радиолокационных характеристик объектов.

*E-mail:* cap\_emela@mail.ru.

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2836-1153>

**Кирьянов Олег Евгеньевич**, 1972 г. р., доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник управления НИИИ (РЭБ) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* математическое моделирование рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, измерения радиолокационных характеристик, обратные задачи дифракции.

*E-mail:* olegkir@inbox.ru

**Понькин Виктор Архипович**, 1942 г. р., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИИ (РЭБ) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* разработка методов пространственно-временной обработки радиолокационных и оптических сигналов.

*E-mail:* vaiu@mil.ru

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2023, vol. 26, no. 2, pp. 58–63

DOI 10.18469/1810-3189.2023.26.2.58-63

UDC 621.396.67


Original Research

Received 22 November 2022

Accepted 22 December 2022

Published 30 June 2023

### The accuracy of measuring the coefficients of transmission and reflection of materials in the presence of random errors in the formation of fields


*Evgeny S. Emelyanov* , *Oleg E. Kiryanov*, *Victor A. Ponkin*

Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy»  
54a, Staryh Bolshevikov Street,  
Voronezh, 394064, Russia

**Abstract – Background.** One of the characteristic features of the current stage in the development of military equipment is the widespread use of special structural materials and coatings with specified properties of interaction with electromagnetic fields, which are subject to measurement during production and operation. Most often, measurements are carried out in quasi-flat radiation and reception fields. At the same time, the regularities of the influence of random errors in the formation of flat fields on the accuracy of measuring the characteristics of special structural materials and coatings have not been studied enough. **Aim.** The purpose of this work is to establish quantitative patterns of the influence of random phase errors in the formation of flat fields on the errors in measuring the transmission and reflection coefficients of materials and coatings. **Methods.** Studies of the influence of random phase errors in the formation of flat fields of irradiation and signal reception on the accuracy of measuring the transmission and reflection coefficients of objects were carried out using the methods of mathematical modeling and statistical radio engineering. **Results.** Calculation relations are obtained for estimating the magnitude of errors in measuring the transmission and reflection coefficients. **Conclusion.** With small errors and a small interval of spatial correlation, the errors of the measured average values of the transmission and reflection coefficients are proportional to the errors in the formation of the irradiation and reception fields and the relative value of the spatial correlation interval must exceed 22 degrees.

**Keywords** – random errors in the formation of a flat field; measurement accuracy; passing coefficient; reflection coefficient.

✉ cap\_emela@mail.ru (*Evgeny S. Emelyanov*)

 © Evgeny S. Emelyanov et al., 2023

### References

1. GOST 18353-79 Non-destructive testing. Classification of types and methods. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1979. (In Russ.)
2. O. E. Kir'yanov and V. A. Pon'kin, "Issues of Improving the Information Capabilities of Radio Wave Monitoring Systems for the Radio Technical Characteristics of Layered Objects," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 62–69, 2009. (In Russ.)

3. V. I. Matveev, *Radio Wave Control*, 2nd ed. rev. Moscow: Mashinostroenie, 2006. (In Russ.)
4. P. A. Fedyunin et al., *Microwave Thermomoiature*, P. A. Fedyunin, Ed. Moscow: Mashinostroenie 1, 2004. (In Russ.)
5. D. A. Usanov et al., “Multiparameter measurements of structures by microwave waveguide methods,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 12–17, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7012>. (In Russ.)
6. V. V. Belyaev, O. E. Kir'yanov, and V. A. Pon'kin, *Radar Antenna and Radiophysical Measurements: Monograph*. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2013. (In Russ.)
7. B. R. Levin, *Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering. Book One*. Moscow: Sov. radio, 1969. (In Russ.)
8. D. Khudson, *Statistics for Physicists*. Moscow: Mir, 1970. (In Russ.)

### Information about the Authors

**Evgeny S. Emelyanov** (b. 1982), Candidate of Technical Sciences, deputy head of the Research Institute, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy», Voronezh, Russia.

*Research interests:* development of methods for measuring the radar characteristics of objects.

*E-mail:* cap\_emela@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2836-1153>

**Oleg E. Kiryanov** (b. 1972), Doctor of Technical Sciences, senior researcher, head of the Directorate of the Research Institute of Electronic Equipment, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy», Voronezh, Russia.

*Research interests:* mathematical modeling of the scattering of electromagnetic waves by complex objects, measurement of radar characteristics, inverse diffraction problems.

*E-mail:* olegkir@inbox.ru

**Victor A. Ponkin** (b. 1942), Doctor of Technical Sciences, professor, chief researcher of the Research Institute of Radio Engineering, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy», Voronezh, Russia.

*Research interests:* development of methods for spatio-temporal processing of radar and optical signals.

*E-mail:* vaiu@mil.ru