

III. Радиотехнические измерения

УДК 621.317.44

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АНТЕНН****В.А. Тищенко, В.И. Лукьянов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
otd200@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрены методы определения коэффициента калибровки измерительных антенн в диапазоне от 30 до 1000 МГц в зависимости от используемых средств измерений. Выведены уравнения измерения для каждого метода и на их основе проведены расчёты систематической погрешности измерения коэффициента калибровки антенны, которые позволяют оценить возможности применения метода.

Ключевые слова: измерительная антенна, коэффициент калибровки, напряжённость электрического поля, погрешность.

**METHODS FOR DETERMINING THE CALIBRATION
COEFFICIENT OF MEASURING ANTENNAS****V.A. Tishchenko, V.I. Lukyanov**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
otd200@vniiftri.ru

Abstract. Methods for determining the calibration coefficient of measuring antennas in the range from 30 to 1000 MHz depending on the measuring instruments used are considered. The measurement equations for each method are derived and based on them, calculations of the systematic error of measuring the antenna calibration coefficient are carried out, which allow us to evaluate the possibilities of using the method.

Keywords: measuring antenna, calibration coefficient, electric field strength, error.

Введение

Для измерения напряжённости электрического поля (НЭП) используются измерительные антенны, удовлетворяющие определённым требованиям, которые сформулированы в стандарте по электромагнитной совместимости ГОСТ Р 51319-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний». Кроме конструктивных, ГОСТ Р 51319-99 содержит метрологические требования к измерительным антеннам по коэффициенту стоячей волны (K_{cmU}), диапазону изменения коэффициента калибровки (K) и его погрешности.

Коэффициент калибровки K измерительной антенны в свободном пространстве определяется по формуле:

$$K = \frac{E}{U_0}, \quad (1)$$

где E — среднее квадратическое значение напряжённости электрического поля в плоской волне, распространяющейся в свободном пространстве; U_0 — среднее квадратическое значение напряжения на выходе измерительной антенны, нагруженной на идеальную согласованную нагрузку, равную характеристическому сопротивлению линии передачи.

Коэффициент калибровки K относится к величинам, которые определяются путём косвенных измерений на основании известной зависимости между искомой величиной и величинами, которые находятся прямыми измерениями. Чтобы реализовать определение K с оценкой точности, надо получить уравнение измерений, то есть перейти к измеряемым величинам, исходя из методов измерений, применяемых в рамках ГОСТ Р 8.805-2012 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0,0003 до 2500 МГц», существующих условий измерения, имеющегося набора средств измерений и их точности.

Метод эталонного поля с использованием вольтметра

При реализации метода эталонного поля калибруемую антенну устанавливают в однородное электрическое поле, напряжённость которого известна, и измеряют напряжение U_B на её выходном разъёме вольтметром. Поэтому, чтобы определить K , достаточно выразить напряжение на согласованной нагрузке U_0 через измеряемую величину U_B .

Выразим U_0 через U_B с помощью эквивалентной схемы измерительной антенны, приведённой на рис. 1.

Согласно этой схеме, напряжение U_B , измеряемое вольтметром подключённым к антенне, определяется по формуле:

$$U_B = E \left| \frac{L_m Z_B}{Z_{am} + Z_B} \right|. \quad (2)$$

Аналогичное выражение может быть получено для U_0 , когда антенна нагружена на согласованное сопротивление $Z_B = Z_0$.

$$U_0 = E \left| \frac{L_m Z_0}{Z_{am} + Z_0} \right|. \quad (3)$$

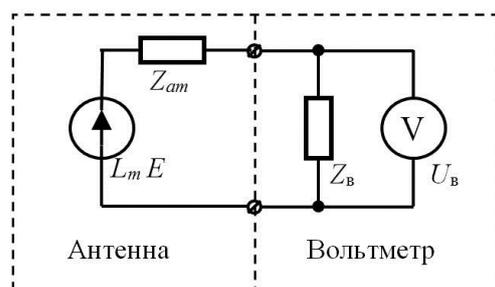


Рис. 1. Эквивалентная схема измерительной антенны: L_m и Z_{am} — действующая длина и сопротивление измерительной антенны (комплексные величины); Z_B — входное сопротивление вольтметра

Из выражений (2) и (3) получаем:

$$U_0 = U_B \left| \frac{Z_0(Z_{am} + Z_B)}{Z_B(Z_{am} + Z_0)} \right|. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1) и используя связь комплексного сопротивления Z и коэффициента отражения Γ в линии передачи:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (5)$$

получаем уравнение измерений K , в которое входят измеряемые величины E , U_B , а также коэффициенты отражения вольтметра Γ_B и измерительной антенны Γ_{am} :

$$K = \frac{E}{U_B} \Phi_B, \quad \text{где } \Phi_B = \left| \frac{1 + \Gamma_B}{1 - \Gamma_{am} \Gamma_B} \right|. \quad (6)$$

Величина Φ_B определяет рассогласование между антенной и вольтметром. Она выражается через коэффициенты отражения, которые в идеальном случае стремятся к нулю, а Φ_B — к единице. Поэтому на практике пользуются приближенной формулой $K = E/U_B$, а величину отклонения Φ_B от единицы относят к погрешности измерений.

На основе полученной формулы измерений (6) получим погрешность δK . Доверительную границу неисклѳенной систематической относительной погрешности (НСП) при доверительной вероятности $P = 0,95$ определим по формуле:

$$\delta K = 1,1 \sqrt{(\delta E)^2 + (\delta U_B)^2 + (\delta \Phi_B)^2}, \quad (7)$$

где δE — предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения НЭП; δU_B — предел допускаемой относительной погрешности измерения напряжения вольтметром; $\delta \Phi_B = |\Phi_B - 1| \leq |\Gamma_B| (1 + |\Gamma_{am}|)$ — предел погрешности рассогласования между антенной и вольтметром.

Для воспроизведения НЭП в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц используются эталонные установки электрического поля типа П1-5 с пределом допускаемой относительной погрешности измерения НЭП 6–9 %. При использовании в качестве вольтметра типового измерительного приёмника погрешность измерения напряжения δU_B составляет 0,5 дБ (6 %). K_{cmU} измерительного приёмника равен 1,5 ($|\Gamma_B| = 0,2$).

Согласно ГОСТ Р 51319-99, K_{cmU} измерительной антенны не должен превышать 3,0 ($|\Gamma_{am}| = 0,5$). Погрешность рассогласования $\delta\Phi_B$ при этом составит 30 %. Итоговое значение δK будет равно 35 % или 2,6 дБ, что превышает предельное значение погрешности 2 дБ, установленное в ГОСТ Р 51319-99 для калибровочного коэффициента измерительной антенны.

Основной составляющей погрешности определения K методом эталонного поля с использованием вольтметра является погрешность рассогласования $\delta\Phi_B$. Возможны два пути, чтобы уменьшить эту составляющую погрешности при использовании описанного метода:

- Непосредственно использовать уравнение измерений K (6). Измерить модули и фазы коэффициентов отражения с помощью анализатора цепей и внести их в уравнение измерений с последующей оценкой остатков систематической погрешности.
- Учитывая, что чем меньше коэффициент отражения от входа вольтметра, тем ближе величина Φ_B к единице, использовать вольтметр с малым $|\Gamma_B|$.

Первый путь весьма трудоёмкий, учитывая, что K должен определяться на нескольких десятках частотных точек. Второй невозможно реализовать в связи с отсутствием подходящих современных среднеквадратических вольтметров в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц с малым коэффициентом отражения.

У изложенного метода возможна модификация, связанная с использованием в качестве вольтметра анализатора спектра, у которого измеряемой величиной вместо полного напряжения на входе U_B является напряжение падающей волны U_{iB} . Используя связь $U_B = U_{iB}(1 + \Gamma_B)$, получим уравнение измерений:

$$K = \frac{E}{U_B} \Phi_{vi}, \quad \text{где } \Phi_{vi} = \left| \frac{1}{1 - \Gamma_{am} \Gamma_B} \right|. \quad (8)$$

При использовании вместо (8) приближённого выражения $K = E/U_B$ погрешность рассогласования можно оценить по формуле $\delta\Phi_{vi} = |\Phi_{vi} - 1| \leq |\Gamma_B \Gamma_{am}|$. Предел погрешности рассогласования в этом случае составит 9 % вместо 30 % для $\delta\Phi_B$.

Метод эталонного поля с использованием ваттметра

В настоящее время существует устойчивая тенденция перехода от измерения среднеквадратического напряжения к измерению мощности. Современные ваттметры в диапазоне частот до 3 ГГц имеют точность выше, чем вольтметры измерительных приёмников. Кроме того, согласование входа ваттметров также лучше.

Поэтому для определения K имеет смысл перейти от измерений среднеквадратического напряжения U к измерению мощности P . В этом случае, выражая напряжение через мощность P_p , поглощённую ваттметром, и входное сопротивление ваттметра Z_p , получим:

$$U = \sqrt{P_p |Z_p|^2 / \operatorname{Re} Z_p}. \quad (9)$$

Используя (9), выражение (1) для K запишется в виде:

$$K = \frac{E}{\sqrt{Z_0 P_0}}, \quad (10)$$

где P_0 — мощность, выделенная на согласованной нагрузке.

Чтобы получить уравнение измерений, выразим с помощью эквивалентной схемы антенны мощность P_0 через мощность поглощённую ваттметром P_p с входным сопротивлением Z_p .

$$P_0 = P_p \frac{Z_0}{\operatorname{Re} Z_p} \left| \frac{Z_{am} + Z_p}{Z_{am} + Z_0} \right|^2. \quad (11)$$

Подставим (11) в (10). С учётом (5) получим уравнение измерений K через мощность поглощённую ваттметром:

$$K = \frac{E}{\sqrt{Z_0 P_p}} \frac{\sqrt{1 - |\Gamma_p|^2}}{|1 - \Gamma_{am} \Gamma_p|}. \quad (12)$$

Отметим, что в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерения мощности современные ваттметры калибруются в единицах «падающей» мощности P_i , которая связана с поглощённой мощностью соотношением:

$$P_p = P_i (1 - |\Gamma_p|^2). \quad (13)$$

Окончательно получим уравнение измерений для K :

$$K = \frac{E}{\sqrt{Z_0 P_i}} \Phi_p, \quad \text{где } \Phi_p = \frac{1}{|1 - \Gamma_{am} \Gamma_p|}. \quad (14)$$

Доверительную границу суммарной НСП измерения K при доверительной вероятности $P = 0,95$ определим по формуле:

$$\delta K = 1,1 \sqrt{(\delta E)^2 + \frac{1}{4}(\delta P_i)^2 + (\delta \Phi_p)^2}, \quad (15)$$

где δE — предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения НЭП; δP_i — предел допускаемой относительной погрешности измерения мощности ваттметром; $\delta \Phi_p = \Phi_p - 1 \leq |\Gamma_{am} \Gamma_p|$ — предел допускаемой погрешности рассогласования между антенной и ваттметром.

Используя типовой ваттметр, погрешность измерения мощности δP_i составит 6 %. При K_{cmU} ваттметра не превышающем 1,13 ($|\Gamma_p| = 0,065$) оценка погрешности $\delta \Phi_p$ составит 3,3 %. Предел погрешности воспроизведения НЭП δE в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц при использовании эталонной установки из состава государственного первичного эталона ГЭТ45-2011 оценивается в 0,3–0,5 дБ (3,5–6 %). Учитывая приведённые значения составляющих, суммарное значение НСП согласно (15) будет равно 6–8 %.

Таким образом, благодаря переходу к измерению мощности, погрешность определения K становится соизмеримой с пределом допускаемой погрешности эталонных средств 2-го разряда. Поэтому откалиброванная с помощью измерителя мощности антенна может использоваться в качестве меры K , — эталонной антенны по ГОСТ Р 8.805-2012 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0,0003 до 2500 МГц».

Метод замещения с использованием эталонной антенны и вольтметра

При использовании метода замещения K калибруемой антенны будет определяться через K , эталонной антенны. Схема метода замещения приведена на рис. 2.

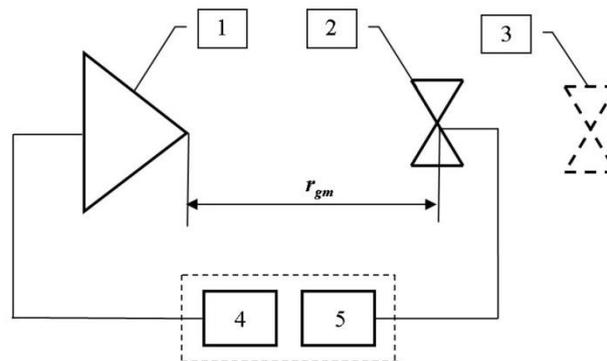


Рис. 2. Схема метода замещения: 1 — генераторная антенна; 2 — калибруемая измерительная антенна; 3 — эталонная антенна; 4 — генератор напряжения; 5 — вольтметр; r_{gm} — расстояние между генераторной и измерительной антеннами

Суть метода замещения состоит в том, что в созданное генераторной антенной электрическое поле в одну и ту же область пространства поочерёдно помещаются эталонная и калибруемая антенны.

При этом в рассматриваемом методе замещения используется вольтметр 5, к которому поочерёдно подключаются калибруемая и эталонная антенны 2, 3. В качестве вольтметра и генератора напряжения используется измерительный приёмник, содержащий трекинг-генератор 4 (обведено штрихами на рис. 2). Величина вспомогательного поля должна поддерживаться одинаковой за время замещения. При этом производится отсчёт показаний вольтметра U_B и $U_{BЭ}$.

Для калибруемой антенны воспользуемся (6). Для эталонной антенны получим аналогичное соотношение:

$$K_3 = \frac{E_3}{U_{BЭ}} \left| \frac{1 + \Gamma_{BЭ}}{1 - \Gamma_{amЭ} \Gamma_{BЭ}} \right|. \quad (19)$$

При использовании одного и того же вольтметра $\Gamma_B = \Gamma_{BЭ} = \Gamma_B$. Разделив (6) на (19), получим уравнение измерений для K через коэффициент калибровки эталонной антенны K_3 :

$$K = K_3 \frac{E U_{BЭ}}{E_3 U_B} \Phi, \quad (20)$$

где

$$\Phi = \left| \frac{1 - \Gamma_{amЭ} \Gamma_B}{1 - \Gamma_{am} \Gamma_B} \right|. \quad (21)$$

Оценим точность использования приближённой формулы:

$$K = K_3 \frac{U_{BЭ}}{U_B}, \quad (22)$$

оценивая погрешности величин, входящих в точную формулу (20). Доверительная граница НСП измерения K при доверительной вероятности $P = 0,95$ определяется по формуле:

$$\delta K = 1,1 \sqrt{(\delta K_3)^2 + (\delta(U_{BЭ}/U_B))^2 + (\delta \Phi)^2 + (\delta(E/E_3))^2}, \quad (23)$$

где δK_3 — предел допускаемой относительной погрешности K_3 эталонной антенны; $\delta(U_{BЭ}/U_B)$ — предел допускаемой погрешности измерения отношения напряжений; $\delta \Phi = |\Phi - 1| \leq |\Gamma_B| (|\Gamma_{amЭ}| + |\Gamma_{am}|)$ — предел допускаемой погрешности рассогласования; $\delta(E/E_3)$ — предел допускаемой погрешности за счёт неодинаковости антенн.

Погрешность калибровочного коэффициента δK_3 указывается в документации на эталонную антенну. Согласно ГОСТ Р 8.805-2012 предел допускаемой погрешности калибровочного коэффициента эталонной антенны находится в диапазоне от 6 до 12 %.

В методе замещения фактически измеряемой величиной является отношение напряжений. Так как измерение производится одним и тем же вольтметром, то предел погрешности $\delta(U_{вз}/U_{в})$ определяется нелинейностью измерительного приёмника, равной 3 %. Оценка предела погрешности $\delta\Phi$ за счёт рассогласования при K_{cmU} калибруемой и эталонной антенны 3,0 ($|\Gamma_{am}| = 0,5$) и вольтметра 1,5 ($|\Gamma_{в}| = 0,2$) равна 20 %.

Метод замещения предполагает, что калибруемая и эталонная антенны помещаются в одно и то же однородное, стабильное за время измерений электрическое поле. Отличие полей E , и E_0 связано с неодинаковостью эталонной и калибруемой антенн, приводящей к различному взаимодействию измерительных антенн с излучающей антенной и окружающими предметами. Погрешность $\delta(E/E_0)$ также в значительной степени определяется условиями, в которых производятся измерения (безэховая камера, открытая площадка), и оценивается в каждом конкретном случае.

Оценка погрешности δK без учёта $\delta(E/E_0)$ составляет 24 %. Поэтому верхний предел погрешности $\delta(E/E_0)$ не должен превышать 10 % при том, что нормируемое значение погрешности δK составляет 2 дБ (26 %).

Основной составляющей погрешности δK является погрешность рассогласования $\delta\Phi$. Она может быть существенно уменьшена (с 20 до 11 %), используя эталонную антенну с хорошим согласованием, что может быть достигнуто, например, включением на выходе эталонной антенны фиксированного аттенюатора.

Метод замещения с использованием эталонной антенны и анализатора цепей

Согласно рис. 2, генераторную антенну с измерительной антенной можно представить как четырёхполюсник, вход которого совпадает с соединительным разъёмом генераторной антенны, а выход — с разъёмом приёмной антенны. Такой четырёхполюсник характеризуется S -параметрами, которые могут быть измерены с помощью анализатора цепей, подключаемого к входу генераторной антенны и к выходу измерительной антенны.

Основное назначение анализаторов цепей — измерение параметров четырёхполюсников. Они могут быть использованы как для измерения коэффициента отражения в однопортовом режиме, так и коэффициента передачи с использованием двух портов. Их основной особенностью является минимальный коэффициент отражения портов при согласовании со стандартизованным трактом. В рассматриваемом частотном диапазоне согласование производится с характеристическим сопротивлением коаксиального тракта Z_0 с коэффициентом отражения Γ менее 0,01, что даёт возможность уменьшить составляющую погрешности рассогласования при измерении K .

Для дальнейшего преобразуем формулу (1) для K так, чтобы в неё входили S -параметры. Используя (3) и (5), получим связь между коэффициентом калибровки и действующей длиной антенны:

$$K = \left| \frac{2}{L_m(1 - \Gamma_{am})} \right|. \quad (24)$$

Действующая длина L_m измерительной антенны при условии, что измерительная антенна находится в дальней зоне генераторной антенны и согласована с ней по поляризации, может быть получена из приведённой в [1] формулы:

$$L_m = \frac{8\pi r_{gm} Z_0 S_{21}}{kW_0 L_g (1 - S_{11}^g)(1 - S_{22}^m)}, \quad (25)$$

где L_g — действующая длина генераторной антенны; $\Gamma_{ag} = S_{11}^g$, $\Gamma_{am} = S_{22}^m$, S_{21} — коэффициент передачи четырехполюсника, образованного генераторной и измерительной антеннами; $W_0 = 120\pi$ — волновое сопротивление свободного пространства; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Из (24) и (25) получим:

$$K = \left| \frac{kL_g (1 - S_{11}^g) W_0}{S_{21}^m 4\pi r_{gm} Z_0} \right|. \quad (26)$$

Отметим, что в правую часть (26), кроме S_{21}^m , входят величины, не связанные с измерительной антенной. S_{21}^m является измеряемой величиной. Это даёт возможность для определения K применить метод замещения калибруемой антенны эталонной с использованием анализатора цепей.

Для эталонной антенны справедливо соотношение, аналогичное (26):

$$K_3 = \left| \frac{kL_g (1 - S_{11}^{g3}) W_0}{S_{21}^{3} 4\pi r_{gm} Z_0} \right|. \quad (27)$$

Разделим (27) на (26). Полагая, что эталонная и измерительная антенны устанавливаются в одну и ту же область пространства, получим полную формулу измерений для K :

$$K = K_3 \left| \frac{S_{21}^3}{S_{21}^m} \left| \frac{L_g}{L_g^3} \right| \frac{(1 - S_{11}^g)}{(1 - S_{11}^{g3})} \right|. \quad (28)$$

Используем её для оценки точности приближённого рабочего уравнения измерения K :

$$K = K_3 \left| \frac{S_{21}^3}{S_{21}^m} \right|. \quad (29)$$

Доверительная граница неисключённой систематической относительной погрешности (НСП) при доверительной вероятности $P = 0,95$ определяется по формуле:

$$\delta K = 1,1 \sqrt{(\delta K_s)^2 + 2(\delta S_{21})^2 + (\delta S_{11}^g)^2 + (\delta L_g)^2}, \quad (30)$$

где δK_s — предел допускаемой относительной погрешности K_s эталонной антенны; δS_{21}^m — предел допускаемой погрешности измерения коэффициента передачи четырёхполосника, образованного генераторной и измерительной антеннами; $\delta(S_{11}^g) = |1 - S_{11}^g| / |1 - S_{11}^{g0}| - 1$ и $\delta(L_g) = L_g / L_g^0 - 1$ — погрешности из-за изменения электрических параметров генераторной антенны за счёт неодинаковости калибруемой и эталонной антенн.

Погрешность эталонного калибровочного коэффициента δK_s указывается в документации на эталонную антенну и согласно ГОСТ Р 8.805-2012 не должна превышать 12 %. Типовое значение погрешности измерения коэффициента передачи анализатором цепей составляет 2 %.

Поэтому верхний предел суммы погрешностей $\delta(S_{11}^g)$ и $\delta(L_g)$ не должен превышать 23 %, при том что нормируемое значение погрешности K составляет 2 дБ (26 %).

Погрешности $\delta(S_{11}^g)$ и $\delta(L_g/L_g^0)$ возникают за счёт изменения электрических характеристик (входного сопротивления и действующей длины генераторной антенны) при замене калибруемой антенны эталонной. Это изменение приводит к изменению электрического поля $\delta(E/E_s)$ из-за неодинаковости антенн. Природа этих составляющих погрешности в методе замещения обусловлена взаимодействием генераторной и измерительной антенн и неоднородностью поля на размере антенны. Они оцениваются для конкретных условий проведения измерений.

Метод замещения для определения калибровочного коэффициента, путём замещения калибруемой антенны эталонной, реализованный с помощью анализатора цепей, отличается от метода с использованием вольтметра (измерительного приёмника) тем, что при замещении антенн отпадает необходимость контролировать и поддерживать одно и то же напряжение на входе генераторной антенны, что упрощает процедуру калибровки.

Выводы

Рассмотрены методы определения коэффициента калибровки измерительных антенн с применением различных средств измерений. Получены уравнения измерения и формулы для оценки систематической погрешности методов. Из полученных результатов следует, что у разных методов, реализующих определения K результирующие погрешности разные, что определяет возможности применения каждого метода.

В частности, метод эталонного поля с измерительным приёмником, имеющим типовые метрологические характеристики, оказался не применим для определения коэффициента калибровки антенн с КСВН = 3,0 с точностью 2 дБ, как рекомендует ГОСТ Р 51319-99. С другой стороны, использование анализатора спектра с таким же рассогласованием входа позволяет использовать этот метод за счёт того, что анализатор спектра градуируется по напряжению падающей волны.

Использование метода эталонного поля с измерителем мощности при использовании установки для воспроизведения НЭП из состава первичного Государственного эталона единицы напряжённости электрического поля ГЭТ 45-2011 позволяет создать меру коэффициента калибровки — эталонную антенну, и с её помощью определять коэффициент калибровки рабочих измерительных антенн методом замещения с использованием вольтметра (измерительного приёмника) или анализатора цепей. После оценки погрешности, связанной с обеспечением условий свободного пространства, которые должны соблюдаться в калибровочных лабораториях, рассмотренные методы измерений дают возможность определять коэффициент калибровки измерительных антенн с погрешностью, нормируемой в ГОСТ Р 51319-99.

Список литературы

Тищенко В.А., Токатлы В.И., Лукьянов В.И., Колотыгин С.А. Уравнение измерения для метода двух (трёх) антенн любого типа // Измерительная техника. — 2012. — № 11. — С. 33–36.

Статья поступила в редакцию: 29.03.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 01.04.2022 г.

Статья принята в работу: 06.04.2022 г.