

ОБ ИЗМЕРЕНИИ КПД И КНД АНТЕНН НА МЕТРОВЫХ ВОЛНАХ ПО ВНЕЗЕМНОМУ РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ

Н. М. Цейтлин

Уточнена методика измерения КПД и КНД антенн, предложенная в [1]. Показано, что при разностном методе измерений относительная ошибка существенно уменьшается (по сравнению с абсолютным методом) за счет увеличения точности известных разностных температур и исключения шумов аппаратуры и антенны. Предлагается при измерениях выбирать области небесной сферы с малыми градиентами температуры. Указаны необходимые области и приведены усредненные по областям значения температуры излучения на волнах $\lambda = 1,5$ м и $\lambda = 3$ м. Дается оценка точности измерения КПД и КНД и приводятся результаты измерений на волнах $\lambda = 1,5$ м и $\lambda = 3$ м.

В работе [1] предложен и теоретически обоснован метод измерения КПД антенн по их собственным шумам и распределенному космическому радиоизлучению. В настоящей статье рассмотрены некоторые конкретные вопросы измерений в диапазоне метровых волн.

1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Космическое излучение включает в себя непрерывно распределенное радиоизлучение (так называемый фон) и излучение дискретных источников [2]. Принимая радиоизлучение фона, можно определить потери в антенной системе [1]; принимая радиоизлучение дискретного источника, можно определить КНД.

Таким образом, для измерения КПД и КНД необходимо, во-первых, знать распределение интенсивности фона по небесной сфере и величину потока излучения дискретных источников, во-вторых, установить связь интенсивности космического радиоизлучения с мощностью на согласованной нагрузке антенны при приеме этого излучения. На рис. 1, 2 представлены изофоты радиоизлучения на волнах 1,5 м [3] и 3 м [2,4]. Из дискретных источников радиоизлучения, кроме Солнца и Луны, наиболее мощными являются Кассиопея-А, Лебедь-А, Телец-А, Центавр-А и Дева-А.

При приеме космического радиоизлучения* из области в направлении φ_0, ψ_0 , не содержащей мощного дискретного источника, „температура шума“ T_a на согласованной нагрузке антенны связана с температурой фона следующим образом [1]:

$$T_a = T_{cp}(\varphi_0, \psi_0) \eta + T_0(1 - \eta) + \Delta T(\varphi_0, \psi_0) \eta, \quad (1)$$

где $T_{cp}(\varphi_0, \psi_0)$ — средняя температура антенны (идеальной), равная [5]

$$T_{cp} = \frac{\int T(\Omega) F_{гл}^2(\Omega) d\Omega}{\int F^2(\Omega) d\Omega}, \quad (2)$$

где $F_{гл}^2(\Omega)$ — главный лепесток диаграммы направленности антенны по мощности, $F^2(\Omega)$ — полная диаграмма, $T(\Omega)$ — температура фона

* О методах приема см., например, [5].

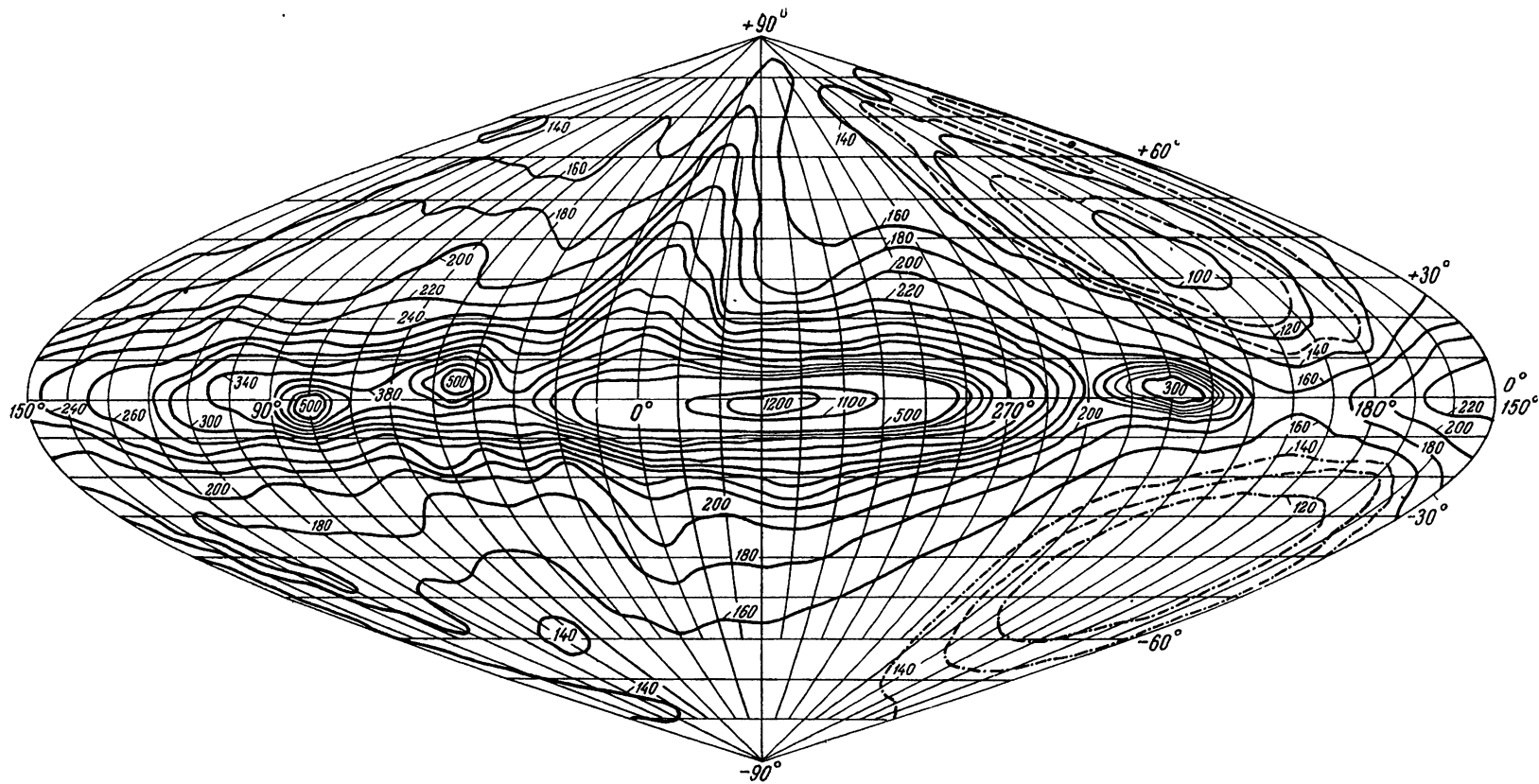


Рис. 1. Изофоты космического радиоизлучения на волне $\lambda = 15 \text{ м}$ [3] (интенсивность излучения указана в градусах яркостной температуры).

излучения, T_0 — температура материала антенной системы, определяющая ее собственные шумы, η — КПД антенной системы и $\Delta T(\varphi_0, \psi_0)$ — средняя температура антенны при приеме излучения от областей, находящихся вне главного лепестка диаграммы направленности антенны. Если по условиям измерений величиной $\Delta T(\varphi_0, \psi_0)$ можно пренебречь по сравнению с $T_{cp}(\varphi_0, \psi_0)$, то, зная $T_{cp}(\varphi_0, \psi_0)$ и T_0 и измеряя T_a , можно найти значение η из выражения

$$T_a = T_{cp}(\varphi_0, \psi_0)\eta + T_0(1 - \eta). \quad (3)$$

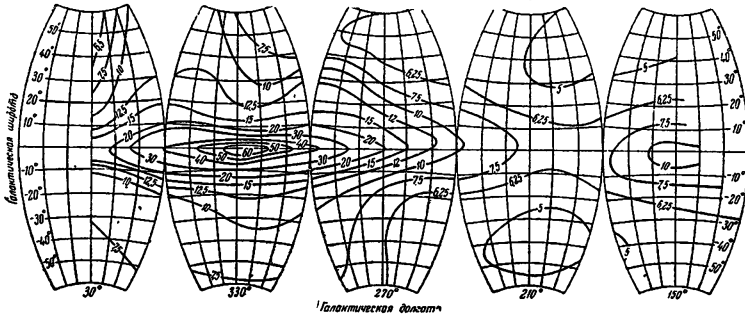


Рис. 2. Изофоты космического радиоизлучения на волне $\lambda=3$ м [4,2] (интенсивность излучения указана в сотнях градусов яркостной температуры).

Зная КПД, можно определить КНД антенны, измеряя интенсивность излучения из области со средней температурой T_{cp} , содержащей дискретный источник интенсивности S_v , *. В этом случае аналогично (3) имеем [1]:

$$T_a = T_{cp}\eta + T_0(1 - \eta) + \frac{1}{k} \frac{\lambda^2}{4\pi} DS_v\eta, \quad (4)$$

где D — КНД антенны.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НА МЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Как указывалось в [1], определение потерь на метровых волнах сводится к сравнению исследуемой антенны со многими антеннами, с помощью которых снимались изофоты космического радиоизлучения. Абсолютные значения температуры, указанной на изофотах, определены по данным авторов с ошибкой порядка 25%. В то же время разность температур излучения из различных областей, достаточно удаленных от центра Галактики, известна с гораздо большей точностью. Сравнение изофот различных авторов (например, [3] и [6,7]) показывает, что расхождение разностных температур не превышает 5%. Естественно поэтому, что наиболее точные значения КПД могут быть получены при измерении разности температур излучения из двух областей, имеющих резко различную температуру.

В этом случае из (1) имеем:

$$\Delta T_a = [T'_{cp}(\varphi', \psi') - T_{cp}(\varphi_0, \psi_0)]\eta + [\Delta T'(\varphi', \psi') - \Delta T(\varphi_0, \psi_0)]\eta. \quad (5)$$

При приеме излучения из областей с резко различной температурой величиной $\Delta T' - \Delta T$ можно пренебречь по сравнению с

* S_v — интенсивность излучения одной поляризации; значения S_v указаны в [2].

$T'_{\text{ср}} - T_{\text{ср}}$, так как обычно ΔT практически не зависит от направления главного лепестка диаграммы антенны. Поэтому

$$\Delta T_a = [T'_{\text{ср}}(\varphi', \psi') - T_{\text{ср}}(\varphi_0, \psi_0)]\eta. \quad (6)$$

При измерении разностной температуры излучения исключаются собственные шумы антенно-фидерной системы и, что особенно важно, исключаются ошибки за счет паразитных сигналов от собственных шумов входа аппаратуры [8].

Из (6) видно, что систематическая ошибка в определении η обусловлена аппаратурной ошибкой при измерении ΔT_a^* и ошибкой в определении $T'_{\text{ср}}(\varphi', \psi') - T_{\text{ср}}(\varphi_0, \psi_0)$. Последняя зависит от точности, с которой известна изофот разностная температура излучения областей (порядка 5%, как отмечено выше), от точности снятия диаграммы направленности антенны и интегрирования температуры излучения по ее телесному углу (см. (2)).

Из (2) видно, что чем острее диаграмма направленности антенны и чем медленнее и равномернее меняется температура в пределах ее телесного угла, тем с большей точностью можно определить $T_{\text{ср}}$. Это определяет выбор областей излучения и накладывает ограничение на ширину диаграммы направленности исследуемой антенны при заданной точности определения η . Области должны быть достаточно удалены от центра Галактики и иметь большую разность температур, а в каждой области желательно иметь малый температурный градиент, достаточно постоянный в пределах телесного угла диаграммы направленности.

На широтах выше $10^\circ - 15^\circ$ с.ш. в качестве опорной области φ_0, ψ_0 , относительно которой ведется отсчет интенсивности излучения из других областей, удобнее всего выбрать область Полярной звезды ($l = 90^\circ$; $b = +28^\circ$). Эта область имеет низкую температуру излучения и небольшой, медленно меняющийся температурный градиент (см. рис. 1). Практически эта область удобна тем, что в течение суток она остается неподвижной на небесной сфере. В качестве второй области φ', ψ' целесообразно выбрать одну из двух областей с галактическими координатами $l = 10^\circ$; $b = +26^\circ$ и $l = 11^\circ$; $b = 0^\circ$ (см. таблицу 1).

При использовании этих областей для исследования антенн с достаточно узкими диаграммами направленности (для $\lambda = 1,5 \text{ м}$ — при ширине диаграммы на уровне половинной мощности $\Delta\varphi \leq 10^\circ$, для $\lambda = 3 \text{ м}$ — $\Delta\varphi \leq 15^\circ$) в качестве $T_{\text{ср}}$ можно непосредственно использовать температуру, указанную на соответствующей изофоте, проходящей через центр области. При этом, как показывает подсчет, ошибка, вносимая в величину η из-за неточного определения $T_{\text{ср}}$, не превышает 5% **.

Таким образом, для антенн с узкой диаграммой направленности ($\Delta\varphi \leq 10^\circ$ для $\lambda = 1,5 \text{ м}$ и $\Delta\varphi \leq 15^\circ$ для $\lambda = 3 \text{ м}$) можно измерить КПД с ошибкой порядка 10% без точного знания диаграммы направленности.

При измерении КПД антенны с более широкой диаграммой необходимо определять $T_{\text{ср}}$ путем интегрирования температуры излучения по диаграмме направленности антенны, найденной расчетом или измерением, например, по Солнцу. Проще всего проводить интегрирование при диаграмме направленности, представляющей собой тело вращения. В этом случае нахождение $T_{\text{ср}}$ сводится к

* Относительной случайной ошибкой, определяемой флюктуационным порогом чувствительности T_m [5], можно при этих измерениях пренебречь, так как ΔT_a — порядка сотен градусов К, а T_m — порядка 1°К [8], т. е. ошибка меньше 1% [1].

См. таблицу 1.

Значения средних температур по кольцам вокруг центров областей излучения T_k (К°)

$\lambda = 3 \text{ м}$															
r_k в град.	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
Область Полярной звезды $l=90^\circ$, $b = +28^\circ$	600	600	610	610	620	630	640	650	660	680	700	720	760	780	800
Область $l = 10^\circ$, $b = +26^\circ$	1240	1230	1220	1210	1200	1200	1200	1210	1220	1280	1350	1430	1470	1500	1520
Область $l = 11^\circ$, $b = 0^\circ$	3200	3000	2700	2500	2300	2200	2000	1900	1800	1700	1650	1600	1550	1500	1450
Область Кассиопеи $l = 80^\circ$, $b = -1,5^\circ$	1440	1370	1300	1230	1160	1100	1050	1020	980	930	910	890	860	840	830
$\lambda = 1,5 \text{ м}$															
r_k в град.	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19					
Область Полярной звезды $l = 90^\circ$, $b = +28^\circ$	195	195	195	195	200	205	210	215	220	225					
Область $l = 10^\circ$, $b = +26^\circ$	270	270	235	265	270	270	270	275	280	285					
Область $l = 11^\circ$, $b = 0^\circ$	530	530	510	490	470	440	410	390	370	350					
Область Кассиопеи $l = 80^\circ$, $b = -1,5^\circ$	270	270	270	270	270	260	255	250	245	240					

усреднению температуры излучения по кольцам (при $b \leq 30^\circ$) вокруг центра области с „весом“, определяемым формой диаграммы антенны:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^n r_k T_k F_k^2}{\sum_{k=1}^n r_k F_k^2}, \quad (7)$$

где T_k — средняя температура излучения по кольцу радиуса r_k ; F_k^2 — значение диаграммы направленности (по мощности) на кольце радиуса r_k . Соответствующие значения T_k на $\lambda = 1,5$ м и $\lambda = 3$ м для указанных трех областей приведены в таблице 1 (ширина кольца 2° ; r_k — средний радиус кольца)

Из таблицы 1 видно, что при ширине диаграммы направленности 20° на $\lambda = 1,5$ м и 30° на $\lambda = 3$ м использование в качестве $T_{\text{ср}}$ значения температуры центра области ($r_k = 0$) может привести к ошибке в $T'_{\text{ср}} - T_{\text{ср}}$ порядка 15% (в качестве второй области в случае широких диаграмм лучше использовать область с координатами $l = 10^\circ$; $b = +26^\circ$).

Однако если известно, что диаграмма направленности исследуемой антенны является телом вращения и имеет ширину $\Delta\varphi$ на уровне половинной мощности ($\Delta\varphi \leq 20^\circ$ на $\lambda = 1,5$ м и $\Delta\varphi \leq 30^\circ$ на $\lambda = 3$ м), то в качестве $T_{\text{ср}}$ можно брать из таблицы 1 значение T_k , соответствующее величине $r_k = \Delta\varphi/2$. Ошибка в $T'_{\text{ср}} - T_{\text{ср}}$ при этом не превысит 5%.

Если диаграмма направленности не является телом вращения, то ее сечение небесной сферой будет поворачиваться в течение суток относительно изофот радиоизлучения, что приведет к разным значениям $T_{\text{ср}}$ в зависимости от времени наблюдения.

С помощью рассмотренного метода было проведено измерение потерь в антенно-фидерных системах на волнах $\lambda = 1,5$ м (диаграмма $17^\circ \times 19^\circ$) и $\lambda = 3$ м (диаграмма $24^\circ \times 24^\circ$). По нашим оценкам систематическая ошибка в определении потерь в этих системах порядка 15%.

3. ИЗМЕРЕНИЕ КНД АНТЕНН НА МЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Так же, как и при измерении КПД, наиболее точные значения КНД могут быть получены путем измерения разности температур излучения из области, содержащей дискретный источник, и опорной области без источника.

При этом из (4) получаем:

$$\Delta T_a = [T_{\text{ср}1}(\varphi_1, \psi_1) - T_{\text{ср}}(\varphi_0, \psi_0)] \eta + \frac{1}{k} \frac{\lambda^2}{4\pi} S_s D \eta. \quad (8)$$

В качестве дискретного источника радиоизлучения наиболее целесообразно использовать Кассиопею-А ($l = 80^\circ$; $b = -1,5^\circ$) и Лебедь-А ($l = 44^\circ$; $b = +4^\circ$).

Из (8) видно, что в качестве опорной области удобнее всего выбрать область с температурой, равной температуре фона в области источника. Однако изофоты в области источника известны со значительно меньшей точностью; поэтому выбрать область с $T_{\text{ср}}(\varphi_0, \psi_0) = T_{\text{ср}1}(\varphi_1, \psi_1)$ затруднительно.

Целесообразно в качестве опорной выбрать область Полярной звезды. Для остронаправленных антенн при приеме излучения Кассиопеи-А в качестве опорной можно использовать область с координатами $l = 10^\circ$; $b = +26^\circ$, температура фона в которой при-

мерно равна средней температуре области Кассиопей-А (см. таблицу 1).

Максимальная относительная ошибка в определении D равна $\gamma_D = [T_{\text{ср1}}(\varphi_1, \psi_1) - T_{\text{ср}}(\varphi_0, \psi_0)](\gamma_{\Delta T_a} + \gamma_\eta + \gamma_{\Delta T_{\text{ср}}})/T_{\Sigma} + \gamma_{\Delta T_a} + \gamma_\eta + \gamma_S$, (9)

где $T_{\Sigma} = \lambda^2 DS_v / 4\pi k$, а $\gamma_{\Delta T_a}$, $\gamma_{\Delta T_{\text{ср}}}$, γ_η , γ_S — соответственно относительные ошибки определения ΔT_a , $\Delta T_{\text{ср}}$, η и S_v .

Достаточно надежно измерять КНД по излучению дискретного источника можно только у антенн, для которых $T_{\Sigma} \gg T_{\text{ср1}}$, где $T_{\text{ср1}}$ — средняя температура области источника. Из этого условия вытекает, что предельной шириной диаграммы направленности является $\Delta\varphi \simeq 10^\circ$ для $\lambda = 1,5$ м и $\Delta\varphi \simeq 15^\circ$ для $\lambda = 3$ м. Используя данные таблицы 1, из (9) можно оценить ошибку в измерении КНД.

Указанным методом был измерен КНД антенн на $\lambda = 1,5$ м (диаграмма $17^\circ \times 19^\circ$) и на $\lambda = 3$ м (диаграмма $24^\circ \times 24^\circ$). Максимальная систематическая ошибка в определении КНД этих антенн, обусловленная малым превышением сигнала над фоном, согласно (9), порядка 45%. Расхождение же результатов со значениями КНД, полученными другими методами, не превышает 30%. Подобным же образом был измерен КНД антенны на $\lambda = 1,5$ м (диаграмма $9^\circ \times 9^\circ$) в НИЗМИРе. Расхождение с расчетным значением оказалось меньше 10%.

Таким образом, указанным методом можно измерять КПД антенн на метровых волнах ($1 \div 5$ м) с ошибкой порядка 10% при ширине диаграммы $10 \div 15^\circ$, причем ошибка в определении КПД уменьшается с увеличением направленности.

Для антенн с более широкой диаграммой ($20 \div 30^\circ$) КПД может быть измерен также с ошибкой порядка 10% при условии, что диаграмма является телом вращения.

КНД по этому методу можно измерять достаточно точно (с ошибкой порядка $15 \div 20\%$) только у остронаправленных антенн с шириной диаграммы $10 \div 15^\circ$. Как и при измерении КПД, ошибка в определении КНД уменьшается с увеличением направленности.

В заключение выражаю благодарность В. С. Троицкому за руководство работой и указания при составлении статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Троицкий, Радиотехника и электроника, 1, 601 (1956).
2. И. С. Шкловский, Космическое радиоизлучение, ГИТТЛ, М., 1956.
3. F. Drogen, W. Priester, Zs. f. Astrophys., 40, 236 (1956).
4. J. Bolton, K. Westfold, Austr. J. Sci. Res., 3A, 19 (1950).
5. В. С. Троицкий, ЖТФ, 22, 245 (1952), ЖТФ, 21, 995 (1952).
6. C. Allen, C. Gum, Austr. J. Sci. Res., 3, 224 (1950).
7. И. С. Шкловский, Астроном. ж., 29, 424 (1952).
8. В. С. Троицкий, В. Л. Рахлин, А. М. Стародубцев и В. Т. Бобрин, Труды 5-го совещания по вопросам космогонии, изд. АН СССР, М., 1956

Исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
11 июня 1958 г.