

А. Г. Гулян, Н. Д. Езакян, А. С. Аракелян, Л. В. Мадосян

Измерения шумовой температуры антенн высокочувствительной приемной системы

(Представлено академиком НАН РА, доктором физ.-мат. наук А. Г. Гуляном для
опубликования в “Докладах НАН РА”, 13/VI 24,)

Ключевые слова: усилитель, эталонная нагрузка, радиометр, генератор, эффективная площадь, антенная температура, шумовая температура.

Введения: Радиоастрономические методы антенных измерений позволяют экспериментально исследовать основные характеристики излучения антенн, такие, как диаграмма направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ), а также шумовую температуру ($T_{\text{ша}}$) и некоторые другие энергетические характеристики антенны [1 - 4].

При измерении $T_{\text{ша}}$ источники не используются, но применяются меры для минимизации излучения приёма из окружающего пространства приёмной антенной.

Если все естественные внеземные радиоисточники находятся на бесконечном расстоянии от Земли, то для антенны любых размеров заведомо обеспечивается условие дальней зоны, что трудно реализовать при наземных измерениях, особенно для крупных антенн.

Излучение естественных радиоисточников имеют шумовой характер, что даёт возможность экспериментально исследовать характеристики антенн непосредственно на их рабочих частотах.

Развитие космической связи, радиолокации и радиоастрономии привело к созданию больших наземных антенн, и сопровождалось появлением радиоастрономических новых методов измерений параметров антенн и созданием высокочувствительных приемных систем [2, 4, 5].

Одной из важнейших характеристик высокочувствительной приемной системы является ее шумовая температура. Шумовая температура антенны вместе с шумовой температурой входных блоков приемного устройства является одной из основных характеристик для определения чувствительности приёмной системы.

Измерение шумовой температуры антенн сводится к сравнению мощностей на выходе радиометра, обусловленных мощностями антенны и эталонных нагрузок.

Наземные методы измерения параметров антенн изложены в [6, 7]. Известно, что для измерения шумовой температуры антенны наземными методами необходимы стабильные источники опорного сигнала с известной мощностью. Этот факт создает значительные трудности при проведении измерения шумовой температуры антенны по внешнему генератору, так как необходимо точно измерять мощность этого генератора и поддерживать стабильность [1 - 3, 8].

Измерения шумовой температуры антенн. Обычные методы измерений параметров антенн, основанные на использовании наземных передатчиков и приемников, оказываются недостаточными, а в ряде случаев невыполнимыми. Развитие антенной техники невозможно без соответствующего усовершенствования и разработки новых методов антенных измерений.

Необходимость увеличения разрешающей силы и эффективной площади антенны привело к разработкам новых методов исследования параметров антенн.

Измерение $T_{\text{ша}}$ обычно проводится с помощью двух эталонных согласованных нагрузок, включаемых поочередно на вход радиометра, нагретых до различных температур T_1 и T_2 [1, 2] (рис.1 и рис.2).

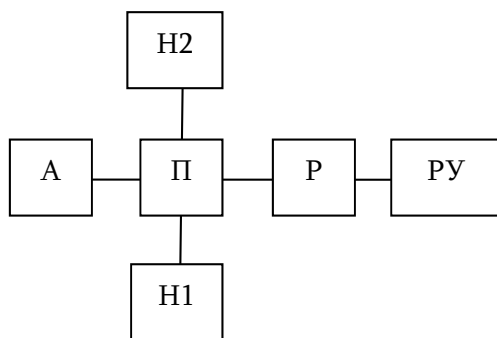


Рис. 1 Схема измерения шумовой температуры антенн методом двух нагрузок

где: А-антенна,
П- переключатель,
Н₁, Н₂ . эталонные нагрузки,
Р-радиометр,
РУ- регистрирующее устройство.

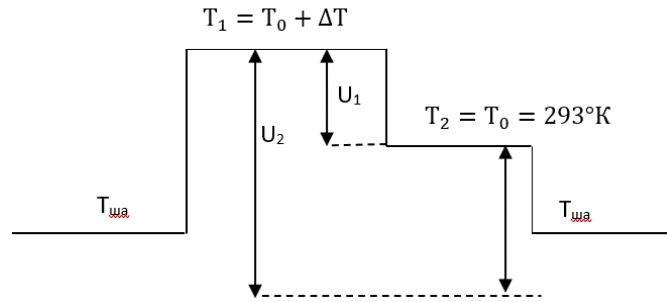


Рис. 2 Образец записи измерения шумовой температуры антенны

где:

$$U_2 \sim T_1 - T_{\text{ша}},$$

$$U_1 \sim T_1 - T_2,$$

$$\alpha = U_2 / U_1.$$

Принимая амплитудную характеристику радиометра линейной для температуры шумов антенны, можно написать (рис.2).

$$T_{\text{ша}} = \alpha T_2 - (\alpha - 1) T_1, \quad (1)$$

где $T_1 > T_2$.

Пренебрегая ошибками рассогласований, для средней квадратичной относительной ошибки измерения шумовой температуры антенны, получим:

$$\sigma_{T_{\text{ша}}} = \pm \sqrt{\left(\frac{T_1 - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left(\frac{(T_1 - T_{\text{ша}})T_2}{T_{\text{ша}}(T_1 - T_2)}\right)^2 \sigma_{T_2}^2 + \left(\frac{(T_1 - T_{\text{ша}})T_1}{T_{\text{ша}}(T_1 - T_2)}\right)^2 \sigma_{T_1}^2} \quad (2)$$

где $\sigma_{T_{\text{ша}}}$, σ_{α} , σ_{T_1} и σ_{T_2} - средние квадратичные относительные ошибки $T_{\text{ша}}$, α , T_1 и T_2 соответственно. Рассмотрим выражения $T_{\text{ша}}$ и $\sigma_{T_{\text{ша}}}$ для конкретных случаев, применяемых на практике.

1. $T_2 = T_0 = 293^\circ\text{K}$ – температура нагрузки, находящейся в окружающей среде, $T_1 = T_0 + \Delta T$ температура горячей нагрузки. Тогда выражение (1) примет вид:

$$T_{\text{ша}} = T_0 - (\alpha - 1) \Delta T. \quad (3)$$

Учитывая, что, увеличивая число измерений σ_{α} можно сделать сколько угодно малым, и, имея одновременно $\sigma_{\alpha} < \sigma_{T_0} \ll \sigma_{\Delta T}$, из выражения (2) для минимальной средней квадратичной ΔT ошибки измерения $T_{\text{ша}}$, получим:

$$\sigma_{T_{\text{ша}}} = \pm \left(\frac{T_0}{T_{\text{ша}}} - 1\right) \sigma_{\Delta T} \quad (4)$$

2. $T_1 = T_0$, а в место T_2 на вход радиометра через направленный ответвитель подается калиброванный сигнал – $T_{\text{ГШ}}$ от газоразрядного или

диодного шумового генератора. Несмотря на то, что в этом случае выражения (3) и (4) не меняются, но так как газоразрядный или диодный генераторы шума являются вторичными эталонами, то величина минимальной квадратичной ошибки будет больше, чем при первом случае.

3. $T_1 = T_0$, $T_2 = T_{аз}$ - температура нагрузки, находящейся в жидком азоте. Тогда выражение (1) примет вид

$$T_{ша} = T_{аз} \alpha - (\alpha - 1) T_0. \quad (5)$$

Принимая, что $\sigma_\alpha < \sigma_{T_0} < \sigma_{T_{аз}}$ для $\sigma_{T_{ша}}$, получим

$$\sigma_{T_{ша}} = \pm \frac{T_{аз}}{T_0 - T_{аз}} \left(\frac{T_0}{T_{ша}} - 1 \right) \sigma_{T_{аз}} \quad (6)$$

Сравнивая выражения (4) и (6) видно, что если $\sigma_{T_{аз}} = \sigma_{\Delta T}$, то точность измерения $T_{ша}$ во втором случае увеличивается в $(T_{аз}/T_0 - T_1)^{-1}$ раз относительно первого.

4. $T_1 = T_0$, $T_2 = T_{гел}$ - температура нагрузки, находящейся в жидком гелии. При этом для $T_{ша}$ и $\sigma_{T_{ша}}$ получим выражения, аналогичные (5) и (6)

$$T_{ша} = \alpha T_{гел} - (\alpha - 1) T_0, \quad (7)$$

$$\sigma_{T_{ша}} = \pm \frac{T_{гел}}{T_0 - T_{гел}} \left(\frac{T_0}{T_{ша}} - 1 \right) \sigma_{T_{гел}} \quad (8)$$

Если при этом $\sigma_{\Delta T} = \sigma_{T_{аз}} = \sigma_{T_{гел}}$, то из (4), (6) и (8) следует, что средняя квадратичная ошибка измерения $T_{ша}$ в третьем случае уменьшается относительно первого и второго в $(T_{гел}/T_0 - T_{гел})^{-1}$ и в $[T_{гел}(T_0 - T_{гел})/(T_{аз}(T_0 - T_{аз}))]^{-1}$ раз соответственно.

5. $T_1 = T_{аз}$, $T_2 = T_{гел}$, т. е. антенна сравнивается с нагрузками, находящимися в жидком гелии и в жидком азоте. В этом случае имеем:

$$T_{ша} = \alpha T_{гел} - (\alpha - 1) T_{аз} \quad (9)$$

$$\sigma_{T_{ша}} = \pm \sqrt{\left(\frac{T_{гел}}{T_{аз} - T_{гел}} \right)^2 \left(\frac{T_{аз}}{T_{ша}} - 1 \right)^2 \sigma_{T_{гел}}^2 + \left(\frac{T_{аз}}{T_{аз} - T_{гел}} \right)^2 \left(1 - \frac{T_{гел}}{T_{ша}} \right)^2 \sigma_{T_{аз}}^2} \quad (10)$$

Количественный анализ формул (10) и (8) показывает, что точность измерения $T_{ша}$ в этом случае несколько повышается относительно четвертого. Несмотря на это, на практике этот случай применяется редко, так как, во-первых, одновременное использование азотных и гелиевых нагрузок связано с практическими трудностями, во-вторых, относительная ошибка аттестации гелиевых нагрузок почти на порядок больше ошибок аттестации азотных нагрузок, что приводит к незначительному выигрышу

при использовании гелиевых нагрузок. Следовательно, для измерения $T_{\text{ша}}$ практически достаточно использовать только азотные нагрузки.

Если амплитудная характеристика радиометра нелинейная, то во всех вышеизложенных случаях при измерении $T_{\text{ша}}$ необходимо учитывать эту нелинейность.

Нами предложен и экспериментально проверен новый метод измерения шумовой температуры антенны, при котором устраняется влияние нелинейности амплитудной характеристики радиометра [4, 8].

Сущность предложенного метода измерения шумовой температуры антенны с помощью поглощающего аттенюатора состоит в том, что роль нагрузки, находящейся в окружающей среде, играет калиброванный поглощающий аттенюатор, введенный во входной тракт радиометра (рис.3).

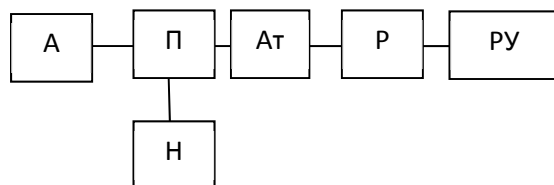


Рис. 3 Схема измерения шумовой температуры антенн методом двух нагрузок

где: А-антенна,
 П- переключатель,
 Н - эталонная нагрузка,
 Ат – аттенюатор,
 Р-радиометр,
 РУ- регистрирующая устройства.

Процедура измерения сводится к записи уровней, соответствующих шумовой температуре антенны ($T_{\text{ша}}$) и нагрузки ($T_{\text{н}}$) (рис.4).

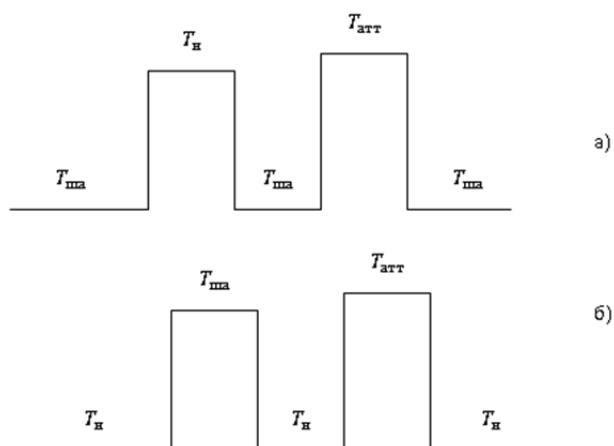


Рис. 4 Образец записи измерения $T_{\text{ша}}$ с помощью аттенюатора

Если $T_{\text{ша}} < T_{\text{н}}$, то при помощи аттенюатора в тракт антенны вводится некоторое затухание β (рис.4) дающее возрастание шумов на входе приемника и шумовая температура определяется из выражения:

$$T_{\text{ша}} = \frac{T_{\text{н}} - \alpha\beta T_0}{1 - \alpha\beta} \quad (11)$$

Если $T_{\text{ша}} > T_{\text{н}}$, то затухание вводится в тракт нагрузки (рис.4), а шумовая температура определяется из выражения:

$$T_{\text{ша}} = T_{\text{н}} + \alpha\beta(T_0 - T_{\text{н}}). \quad (12)$$

В обоих случаях величина β выбирается такой, чтобы обеспечивалось условие $\alpha \approx 1$. Пренебрегая ошибками рассогласований, для средней квадратичной относительной ошибки шумовой температуры антенны предложенным методом получается следующее выражение:

$$\sigma_{T_{\text{ша}}} = \pm \sqrt{\left(\frac{T_{\text{н}} - T_{\text{ша}}}{T_0 - T_{\text{н}}}\right)^2 \left(\frac{T_0 - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 (\sigma_{\alpha} + \sigma_{\beta})^2 + \left(\frac{T_{\text{н}}}{T_0 - T_{\text{н}}}\right)^2 \left(\frac{T_0 - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 \sigma_{T_{\text{н}}}^2 + \left(\frac{T_0}{T_0 - T_{\text{н}}}\right)^2 \left(\frac{T_{\text{н}} - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 \sigma_{T_0}^2} \quad (13)$$

при $T_{\text{ша}} < T_{\text{н}}$,

$$\sigma_{T_{\text{ша}}} = \pm \sqrt{\left(\frac{T_{\text{н}} - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 (\sigma_{\alpha} + \sigma_{\beta})^2 + \left(\frac{T_{\text{н}}}{T_0 - T_{\text{н}}}\right)^2 \left(\frac{T_0 - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 \sigma_{T_{\text{н}}}^2 + \left(\frac{T_0}{T_0 - T_{\text{н}}}\right)^2 \left(\frac{T_{\text{н}} - T_{\text{ша}}}{T_{\text{ша}}}\right)^2 \sigma_{T_0}^2} \quad (14)$$

при $T_{\text{ша}} > T_{\text{н}}$.

В предложенном нами методе калибровки аттенюатора доказывается, что σ_{β} можно сделать очень малым [9].

Принимая, что $\sigma_{\beta} \ll \sigma_{\alpha} < \sigma_{T_0} < \sigma_{T_{\text{н}}}$ для минимальной средней квадратичной относительной ошибки $T_{\text{ша}}$ получим:

$$\sigma_{T_{\text{ша}}} = \pm \frac{T_{\text{н}}}{T_0 - T_{\text{н}}} \left(\frac{T_0}{T_{\text{ша}}} - 1 \right) \sigma_{T_{\text{н}}} \quad (15)$$

Из (6), (8) и (14) видно, что минимальная средняя квадратичная относительная ошибка $\sigma_{T_{\text{ша}}}$ предложенного метода и метода "двух нагрузок" равны.

Для измерения параметров антенны с помощью прецизионного поглощающего аттенюатора, нами предложен метод калибровки аттенюатора позволяющий с высокой точностью определить затухание β [9]. Показано, что величина затухания аттенюатора не зависит от абсолютных значений температур входных нагрузок и ее можно измерять с достаточно высокой точностью, увеличивая число измерений. Этим объясняется возможность пренебрежения σ_{β} относительно $\sigma_{T_{\text{н}}}$. Показано так же, что при такой

калибровке аттенюатора его первичное затухание не влияет на результаты измерения шумовой температуры антенны.

Заключение

- Разработан и экспериментально исследован новый метод измерения шумовой температуры антенн с помощью поглощающего аттенюатора, который устраняет влияние нелинейности амплитудной характеристики радиометра и очень удобен в практическом применении.
- Показано, что предложенный метод измерения по сравнению с методом “двух нагрузок” $T_{ша}$, для получения одинаковой точности измерений, уменьшает число измерений и в $[(T_0 - T_{аз})/(T_{аз} - T_{ша})]^2$ раз при $T_{ша} < T_n$ и в $[(T_0 - T_{ша})/(T_{ша} - T_0)]^2$ раз при $T_{ша} > T_{аз}$.
- Показано, что если одна из нагрузок и аттенюатор находятся при температуре окружающей среды (T_0), то величина затухания аттенюатора (β) не зависит от абсолютных значений температур входных нагрузок и ее можно измерять с достаточно высокой точностью увеличивая число измерений.
- Теоретически и экспериментально показано, что измерения шумовой температуры антенны достаточно производить только с помощью азотной нагрузки, так как использование гелиевой нагрузки практически незначительно улучшает точность измерений.
- Доказано также, что при такой калибровке аттенюатора его первичное затухание не влияет на результаты измерений шумовой температуры антенны.

ՀՀ ԳԱԱ ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ
e-mails: n.yezakyan@hotmail.com
madalevondi@mail.ru;
hasmikstepani59@gmail.com

А. Г. Гулян, Н. Д. Езакян, А. С. Аракелян, Л. В. Мадосян

Измерения шумовой температуры антенн высокочувствительной приемной системы

Радиоастрономические методы измерения параметров антенн позволяют с высокой точностью измерять шумовую температуру на входе радиометра. В связи с появлением антенн с высокой эффективностью повысились требования к высокоточным измерениям шумовой температуры антенн.

Показано, что для получения одинаковой точности измерений предложенный метод уменьшит число измерений почти на порядок по сравнению с методом “двух нагрузок”. Это обстоятельство резко сокращает время, необходимое для

измерения шумовой температуры, что очень важно при измерениях шумовой температуры крупных антенн.

Ա. Գ. Ղուլյան, Ն. Դ. Եզակյան, Լ. Վ. Մադոսյան, Հ. Ս. Առաքելյան

Անտենայի աղմկային ջերմաստիճանի չափումը

Անտենաների բնութագրերի չափման ռադիոաստղագիտական եղանակը թույլ է տալիս մեծ ճշտությամբ չափել անտենայի աղմկային ջերմաստիճանը ռադիոմետրի մուտքում: Մեծ արդյունավետությամբ անտենաների ի հայտ գալը բարձրացրեց պահանջները մեծ ճշտությամբ անտենայի աղմկային ջերմաստիճանի չափման համար:

Ցույց է տրված, որ նույն չափման ճշգրտությունը ստանալու համար առաջարկվող մեթոդը նվազեցնում է չափումների թիվը գրեթե կարգով՝ համեմատած «երկու բեռնվածքի» մեթոդի հետ: Այս հանգամանքը կտրուկ նվազեցնում է աղմկային ջերմաստիճանի չափման համար անհրաժեշտ ժամանակը, ինչը շատ կարևոր է մեծ անտենաների աղմուկի ջերմաստիճանը չափելիս:

A. G. Ghulyan, N. D. Yezakyan, L. V. Madosyan, H. S. Arakelyan

Measuring the noise temperature of antenna

Radioastronomy method for measuring antenna properties allows to measure noise temperature in the input of radiometer. Because of high-efficiency antennas were founded, the requirements for high-precision measurements of noise temperature of antennas have increased.

It is shown that in order to obtain the same measurement accuracy, the proposed method will reduce the number of measurements by almost an order of magnitude compared to the “two loads” method. This circumstance sharply reduces the time required to measure noise temperature, which is very important when measuring the noise temperature of large antennas.

Литература

1. *А. Д. Кузьмин, А. Е. Соломонович.* Радиоастрономические методы измерения параметров антенн, М., "Советское радио", 1964.
2. *Мартиросян Р. М.* Радиоастрономический метод измерения параметров СВЧ приемных устройств. Тезисы докладов XVII Всесоюз. Радиоастрономической конф. По аппаратуре. Ереван, 1985. – с. 370.
3. *А. Г. Гулян.* Диссертация на соискание ученой степени доктора физ. мат. наук. Измерение параметров антенн дальней космической связи радиоастрономическими методами, г. Харьков, 1990.
4. *Н. А. Есенкина, Д. В. Корольков, Ю. И. Парийский.* Радиотелескопы и радиометры/ Издательство “Наука” М. 1973.
5. *Физика космоса: [рос.]: Маленькая энциклопедия. Главный редактор: Р. А. Сюняев. Редакционная коллегия: Ю. Н. Дрожджин-Лабинский,*

- Я. Б. Зельдович, В. Г. Курт, Р. З. Сагдеев. Москва. Советская энциклопедия, 1986. Предисловие к электронной версии 2-го издания энциклопедии «Физика космоса» 6 июля 2004 года.
6. Г. З. Айзенберг. Антенны ультракоротких волн. Связ. Издат. М. 1957.
 7. А. М. Асланян, А. Г. Гулян. Изв. АН Арм ССР, физика, 8, 148, 1973.
 8. Гавриленко В. Г., Калинин А. В. Методы измерения характеристик антенн по сигналам внеземных радиоисточников. Нижегородской госуниверситет, 2012, с. 58.
 9. А. А. Пистелькорс. Антенна, Связ. издат. М. 1947.