

Результаты исследования методов оценки интегрального коэффициента шума приёмной части АФАР

А.В. Редька¹, В.И. Протасов², О.С. Алексеев²

¹ АО «Микроволновые системы», г. Москва

² АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», г. Жуковский

Аннотация: В работе представлены результаты оценки интегрального коэффициента шума АФАР двумя различными методами – методом холодного источника и методом N-кратного превышения. Описаны методы оценки интегрального коэффициента шума АФАР. Выявлены различия в полученных результатах.

Ключевые слова: АФАР, приёмный тракт, коэффициент шума

1. Введение

В настоящее время в радиоэлектронной аппаратуре всё чаще применяются активные фазированные решётки – АФАР. Сквозной приёмный канал комплексов с АФАР имеет некоторые особенности. Отличие заключается в том, что входная часть приёмного канала – малошумящий усилитель – входит в состав каждого канала антенны [1]. Таким образом, основной вклад в величину коэффициента шума ($K_{ш}$) сквозного приёмного канала вносит АФАР. Поскольку АФАР является многополюсником, инструментальные методы непосредственного измерения $K_{ш}$ или шумовой температуры не известны [2]. Поэтому необходимо исследовать методики, позволяющие косвенным методом оценивать значения $K_{ш}$ АФАР с необходимой точностью.

Существуют два основных метода оценки коэффициента шума четырёхполюсников. Наиболее широко используемым является метод, который получил в зарубежной литературе название метода Y-фактора или горячего/холодного источника шума. В нашей литературе этот метод также еще носит название метод N-кратного превышения. Второй метод оценки коэффициента шума - метод холодного источника, который также иногда называют методом прямого измерения шума. Принципы оценки $K_{ш}$ данными методами хорошо известны [3].

Непосредственные методы оценки $K_{ш}$ АФАР рассматривались в [4, 5].

2. Оценка интегрального коэффициента шума АФАР методом холодного источника.

В настоящее время интегральный коэффициент шума АФАР оценивается проводится по методике, базирующейся на основе метода холодного источника (прямого измерения шума) при равномерном амплитудном распределении. Схема измерения приведена на рисунке 1.

Оценка значения $K_{ш}$ АФАР в режиме приема проводится следующим образом. Для начала определяется интегральный активный коэффициент усиления АФАР в режиме синфазного приема по стандартной методике с эталонным замещающим рупором. АФАР помещается в безэховой камере (БЭК) и включается на прием. Устанавливается заданное амплитудное распределение по раскрытию. АФАР фазировается на рабочей частоте в направлении $(0^\circ; 0^\circ)$ в режиме узкого луча. Через излучающий рупор и коллиматор подается сигнал от СВЧ генератора. К выходу АФАР

подключается анализатор спектра. С помощью аттенюатора, включенного на выходе СВЧ генератора, на экране анализатора спектра (АС) устанавливается хорошо различимый уровень сигнала P , при этом фиксируется показание шкалы аттенюатора A_0 в дБ.

Затем АФАР выключается и на минимальном расстоянии перед раскрывом АФАР в центре размещается эталонный рупор с известным коэффициентом усиления $G_э$ в диапазоне рабочих частот. Анализатор спектра подключается к эталонному рупору. Изменяя затухание, вносимое аттенюатором, на экране анализатора спектра устанавливается показание P и фиксируется показание шкалы аттенюатора $A_э$ в дБ. Общий коэффициент усиления АФАР K_y в децибелах определяется по формуле:

$$K_y = G_э + (A_0 - A_э), \quad (1)$$

где: $G_э$ – коэффициент усиления эталонного рупора, дБ; $A_э$ – показания шкалы аттенюатора при подключении эталонного рупора, дБ; A_0 – показания шкалы аттенюатора при подключении АФАР, дБ.

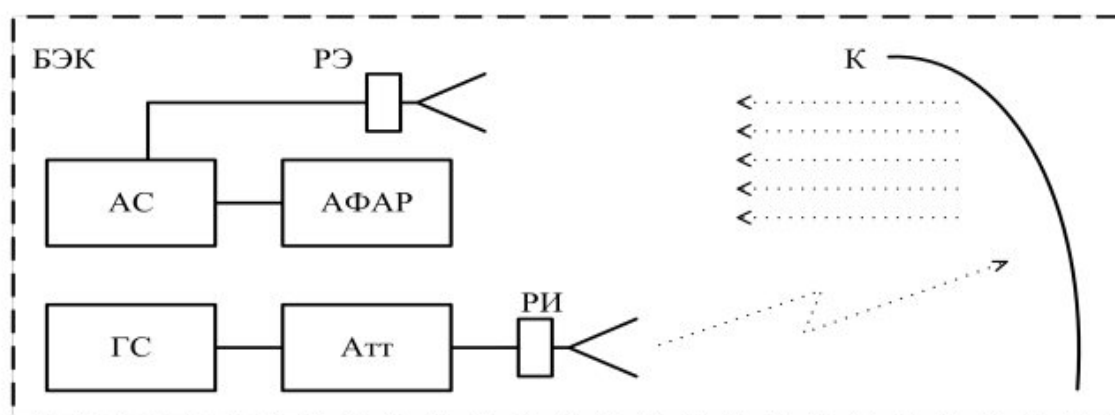


Рисунок 1. Схема установки измерения КШ АФАР методом холодного источника. БЭК – безэховая камера, ГС – генератор СВЧ, Атт – аттенюатор, РИ – рупор излучающий, К – коллиматор, АФАР – измеряемая АФАР, АС – анализатор спектра, РЭ – рупор эталонный

Для определения интегрального активного коэффициента усиления АФАР нужно из измеренного значения K_y вычесть составляющую, обусловленную направленными свойствами АФАР – $K_{нд}$. Для нахождения $K_{нд}$ используем результаты компьютерного моделирования АФАР с учетом заданного амплитудного распределения по раскрыву и средних значений среднеквадратичных ошибок по амплитуде и фазе. Определенные по результатам моделирования значения $K_{нд}$ и измеренные значения общего коэффициента усиления K_y в диапазоне рабочих частот сводятся в таблицу.

Интегральный активный коэффициент усиления АФАР K_{yA} , дБ в режиме синфазного приема рассчитывается по формуле:

$$K_{yA} = K_y - K_{нд} \quad (2)$$

Далее проводится измерение мощности шума $P_{ш}$ по выходу АФАР в режиме приема с помощью анализатора спектра в заданной полосе пропускания приемного канала ΔF . Расчет интегрального коэффициента шума АФАР в режиме приема проводится по формуле:

$$K_{\text{ш}} = P_{\text{ш}} / k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot K_{\text{уА}} \quad (3)$$

где: $P_{\text{ш}}$ – измеренный уровень собственного шума приемных каналов, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К – постоянная Больцмана, T_0 – абсолютная температура 293 К, $K_{\text{уА}}$ – активный коэффициент усиления АФАР, ΔF – полоса частот, в которой проведено измерение шума по выходу АФАР.

3. Оценка интегрального коэффициента шума АФАР методом N-кратного превышения.

Стандартная методика измерения коэффициента шума указанным методом состоит в следующем. Ко входу четырехполосника подключается генератор шума и проводятся последовательные измерения мощности шумов в заданной полосе частот на выходе четырехполосника при выключенном и при включенном генераторе шума.

В первом случае на входе четырехполосника присутствуют только тепловые шумы внутреннего сопротивления генератора шума $P_{\text{вс}}$, и суммарная мощность выходного шума $P_{\text{ш}\Sigma 1}$ составит:

$$P_{\text{ш}\Sigma 1} = P_{\text{вс}} \cdot K_{\text{у}} + P_{\text{шс}}, \quad (4)$$

где: $K_{\text{у}}$ – коэффициент усиления по мощности исследуемого устройства, $P_{\text{шс}}$ – мощность собственного шума четырехполосника.

Во втором случае к тепловым шумам внутреннего сопротивления генератора шума $P_{\text{вс}}$ на входе четырехполосника добавится измерительный шум $P_{\text{ши}}$, и суммарная мощность выходного шума тестируемого устройства $P_{\text{ш}\Sigma 2}$ составит:

$$P_{\text{ш}\Sigma 2} = (P_{\text{вс}} + P_{\text{ши}}) \cdot K_{\text{у}} + P_{\text{шс}} = P_{\text{ш}\Sigma 1} + P_{\text{ши}} \cdot K_{\text{у}}. \quad (5)$$

Согласно одному из определений коэффициента шума $K_{\text{ш}}$, его можно вычислить следующим образом:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{шВых}}}{P_{\text{шВх}} \cdot K_{\text{у}}} = \frac{P_{\text{ш}\Sigma 1}}{P_{\text{вс}} \cdot K_{\text{у}}}, \quad (6)$$

где: $P_{\text{шВх}}$ – мощность шумов на входе четырехполосника при подключении к входу согласованной нагрузки при температуре 290 К, $P_{\text{шВых}}$ – измеренная мощность шумов на выходе четырехполосника в этом случае.

Коэффициент усиления вычисляем по результатам двух измерений:

$$P_{\text{ш}\Sigma 2} = P_{\text{ш}\Sigma 1} + P_{\text{ши}} \cdot K_{\text{у}} = N \cdot P_{\text{ш}\Sigma 1}, \quad (7)$$

$$K_{\text{у}} = \frac{(N - 1) \cdot P_{\text{ш}\Sigma 1}}{P_{\text{ши}}} \quad (8)$$

где: N – отношение измеренных мощностей шумов на выходе четырехполосника в двух рассматриваемых случаях.

В результате подстановки выражения для $K_{\text{у}}$ в (6) получим следующее выражение:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш}\Sigma 1}}{P_{\text{вс}} \cdot K_{\text{у}}} = \frac{P_{\text{ш}\Sigma 1} \cdot P_{\text{ши}}}{P_{\text{вс}} \cdot (N - 1) \cdot P_{\text{ш}\Sigma 1}} = \frac{P_{\text{ши}}}{P_{\text{вс}} \cdot (N - 1)} \quad (9)$$

В обоих проведенных измерениях внутреннее сопротивление источника сигнала было одним и тем же, соответственно, условия согласования оставались неизменными. Поэтому можно заменить отношение фактических мощностей $P_{\text{вс}}$ и $P_{\text{ши}}$ на отношение номинальных мощностей $P_{\text{всн}}$ и $P_{\text{шин}}$ (в условиях идеального

согласования) и выражение для коэффициента шума примет вид:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ши}}}{P_{\text{вс}} \cdot (N-1)} = \frac{P_{\text{шин}}}{P_{\text{всн}} \cdot (N-1)} = \frac{P_{\text{шин}}}{k \cdot T_0 \cdot \Delta F \left(\frac{P_{\text{ш}} \sum_{i=1}^N 2}{P_{\text{ш}} \sum_{i=1}^N 1} - 1 \right)}, \quad (10)$$

где: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К – постоянная Больцмана, T_0 – абсолютная температура 293 К, ΔF – ширина полосы, в которой нужно провести измерения коэффициента шума.

В случае оценки коэффициента шума АФАР с использованием методики на основе метода N-кратного превышения возникает следующая проблема. АФАР имеет излучающую систему, относящуюся к классу апертурных антенн. В качестве номинальной мощности измерительного шума $P_{\text{шин}}$, принимаемого антенной логично считать мощность шума, падающего на плоскую поверхность ограниченную апертурой антенны и перпендикулярной направлению распространения сигнала. Теоретический расчет этой величины зависит от конкретной конфигурации стенда измерения параметров антенн и взаимного расположения элементов стенда, в связи с чем, на практике не реализуем с приемлемой погрешностью. В условиях реального стенда БЭК предлагается следующее решение данной проблемы.

Сделаем следующие допущения:

- Система облучатель-коллиматор стенда БЭК формирует плоский фронт излучения в заданном диапазоне частот, плоскости фронтов на разных частотах диапазона параллельны.
- Ось диаграммы направленности измеряемой антенны направлена перпендикулярно фронту падающего излучения.
- Интенсивность создаваемого системой облучатель-коллиматор излучения в каждой точке в пределах площади, которую занимает апертура АФАР, считаем постоянной.
- Температура входных каскадов приемных каналов АФАР и выходного сопротивления генератора шума составляет 293 К.

С использованием введенных допущений можно определить мощность падающего на апертуру АФАР излучения через дополнительное измерение, проводимое с использованием калиброванной измерительной антенны с известными значениями эффективной площади апертуры в заданном диапазоне радиочастот. Для этого АФАР заменяют измерительной антенной, настраивают ее положение по критерию максимальной мощности принятого сигнала, проводят измерение мощности шумов на выходе измерительной антенны при включенном генераторе шума, после чего находят интенсивность излучения в пределах апертуры АФАР как:

$$I = P_{\text{шАИ}} / S_{\text{АИ}} \quad (11)$$

где $P_{\text{шАИ}}$ – мощность шумов на выходе измерительной антенны, $S_{\text{АИ}}$ – эффективная площадь апертуры измерительной антенны при данном значении рабочей частоты f_0 (принимается постоянной для диапазона $\Delta f_{\text{ш}} = f_0 - \Delta F/2 \leq f \leq f_0 + \Delta F/2$, где ΔF – полоса частот, в которой проведено измерение шума).

С учетом вышеизложенного предлагаемая методика измерения коэффициента шума АФАР описана ниже. Схема испытаний приведена на рисунке 2.

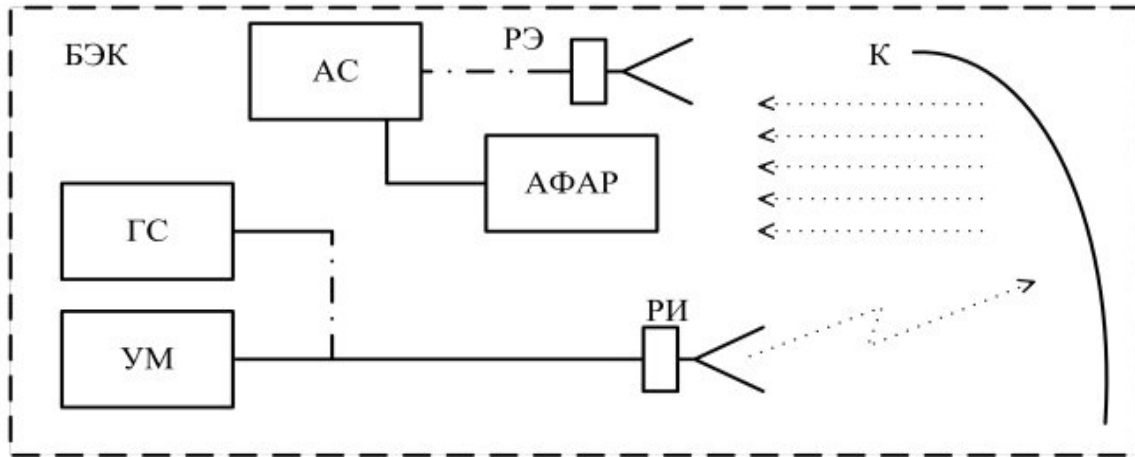


Рисунок 2. Схема установки измерения КШ АФАР методом N-кратного превышения. БЭК – безэховая камера, ГС – генератор СВЧ, УМ – усилитель мощности, РИ – рупор излучающий, К – коллиматор, АФАР – измеряемая АФАР, АС – анализатор спектра, РЭ – рупор эталонный.

1. Произвести фазирование АФАР на требуемой рабочей частоте f_0 , установить заданный тип амплитудно-фазового распределения.
2. Подключить к фидеру коллиматора стенда БЭК генератор пилот сигнала на рабочей частоте f_0 .
3. Произвести настройку углового положения АФАР по критерию максимальной мощности принятого сигнала на выходе распределительной системы.
4. Подключить к фидеру облучателя коллиматора стенда БЭК генератор шума, в качестве которого может использоваться широкополосный усилитель СВЧ, вход которого подключен к согласованной нагрузке. Принимаем, что спектральная плотность мощности шумов имеющегося в наличии генератора постоянна в полосе $\Delta f_{\text{ш}}$.
5. Измерить интегральную мощность шумов $P_{\text{ш}\Sigma 1}$ при выключенном генераторе шума и $P_{\text{ш}\Sigma 2}$ при включенном генераторе шума на выходе выбранной распределительной системы АФАР в полосе $\Delta f_{\text{ш}}$.
6. Заменить АФАР калиброванной измерительной антенной, провести настройку ее углового положения аналогично п.3.
7. Измерить интегральную мощность шумов $P_{\text{шАИ}}$ на выходе измерительной антенны в полосе $\Delta f_{\text{ш}}$ при включенном генераторе шума.
8. Измерить затухание радиочастотных кабелей, использовавшихся для соединения анализатора спектра с АФАР L_{K1} и измерительной антенной L_{K2} .
9. Измерить интегральную мощность шумов анализатора спектра $P_{\text{шАС}}$, когда к его входу подключена согласованная нагрузка.

Формула расчета коэффициента шума для данной методики примет следующий вид:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{шИН}}}{P_{\text{всн}} \cdot (N-1)} = \frac{(P_{\text{шАИ}}/S_{\text{АИ}}) \cdot n \cdot S_0 \cdot \vartheta}{k \cdot T_0 \cdot \Delta F \left(\frac{P_{\text{ш}\Sigma 2}}{P_{\text{ш}\Sigma 1}} - 1 \right)} = \frac{(P_{\text{шАИ}} \cdot L_{K1} - P_{\text{шАС}}) \cdot L_{K2} \cdot n \cdot S_0 \cdot \vartheta}{S_{\text{АИ}} \cdot k \cdot T_0 \cdot \Delta F \left(\frac{P_{\text{ш}\Sigma 2} \cdot L_{K1} - P_{\text{шАС}}}{P_{\text{ш}\Sigma 1} \cdot L_{K1} - P_{\text{шАС}}} - 1 \right)} \quad (12)$$

где: n – количество излучателей в АФАР, S_0 – площадь поверхности излучателя, ϑ – коэффициент использования поверхности излучателя.

4. Результаты работы и выводы.

Результаты оценки интегрального коэффициента шума АФАР методами

холодного источника (Х. И.) и N-кратного превышения (N) приведены в таблице 1. Оценка проводилась на трех точках частотного диапазона при равномерном амплитудном распределении.

Таблица 1.

АФАР	№1		№2		№3		№4	
f_H	NF ₁	NF ₁ +1,1	NF ₂	NF ₂ +1,5	NF ₃	NF ₃ +0,4	NF ₄	NF ₄ +0,6
f_{CP}	NF ₁	NF ₁	NF ₂	NF ₂ +1,3	NF ₃	NF ₃ +0,6	NF ₄	NF ₄ +0,5
f_B	NF ₁	NF ₁ +1,2	NF ₂	NF ₂ +1,4	NF ₃	NF ₃ +0,8	NF ₄	NF ₄ +1,1
Метод	Х. И.	N	Х. И.	N	Х. И.	N	Х. И.	N

где NF1... NF4 – нормированные значения коэффициента шума.

По результатам измерений сделаны следующие выводы.

1. Численный разброс значений NF₁... NF₄ достаточно велик и может достигать 1,5 дБ.
2. Необходимо отметить значительную разницу в измерениях различными методами АФАР №2, которая также может достигать 1,5 дБ. Разница измерений для АФАР №3 в основном не превысила 1 дБ.
3. По результатам исследований метода холодного источника сделано предположение, что основной вклад в погрешность измерения вносит погрешность измерения K_y – общего коэффициента усиления АФАР.
4. По результатам исследования метода N-кратного превышения сделано предположение, что на значительный разброс величины K_ш вносит погрешности измерений тестового уровня шума.
5. Для повышения точности измерений необходимо провести дополнительные исследования.

Список литературы

1. В. А. Хлусов, В. В. Доценко. Сравнительный анализ коэффициента шума пассивных и активных антенных решёток. – Радиотехника, 2018 г., №2.
2. Karl F. Warnick and Brian D. Jeffs. Efficiencies and System Temperature for Beamforming Array. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008 г.
3. К. И. Алмазов-Долженко. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ – М.: «Научный мир», 2000. – с. 240.
4. Синани А.И., Гриднев В.И. Метод измерения коэффициента шума и шумовой температуры АФАР в соответствии со стандартами IEEE // Антенны. 2021. № 5. С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202105-04>
5. Усманов Р.Р., Рябиков В.В., Тюрин Д.М. Измерение коэффициента шума АФАР / В кн. «Антенны и радары с электронным управлением лучом» / Под ред. А. И. Синани, Г. В. Кауфмана. М.: Радиотехника. 2016.