

Энергетические характеристики в радиотепловом локаторе

А.Н. Титов

АО «НИИ Приборостроения имени В.В. Тихомирова»

Россия, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д.3, niki@nio11.niip.ru

В работе даётся ряд уточнений, необходимость которых обусловлена весьма распространёнными ошибками и неясностями в выражениях для электромагнитного излучения нагретых тел. Предлагается также инженерная методика расчёта энергетических соотношений в линиях связи пассивной радиотепловой локации. Методика основана на введённых понятиях эквивалентной мощности, подводимой к виртуальной передающей антенне, и коэффициента усиления этой антенны.

Введение

На приеме собственного электромагнитного излучения нагретых тел основана работа систем радиотепловой локации, систем теплового самонаведения, тепловизоров, систем исследования космического пространства, систем дистанционного зондирования земной поверхности и т.д. Для создания высококачественной аппаратуры подобного назначения необходимо надёжно и точно рассчитывать энергетические характеристики принимаемых сигналов. Как известно, физической основой для расчета таких характеристик является закон Планка, описывающий уровни теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Закон был сформулирован и обнародован М. Планком в 1900 г., в сущности, до появления радиотехники. И тогда за параметр излучения принимали не частоту, а длину волны излучения. Частота сигнала и единица ее измерения $\Gamma\text{ц}$ официально были введены Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) лишь в 1930 г. Это обстоятельство объясняет возникшие в радиотехнической литературе недоразумения, связанные с использованием закона Планка для анализа теплового радиоизлучения. Положение усугубилось тем, что в русскоязычной технической литературе для названия уровней теплового излучения использовались различные сочетания слов часто без указания размерностей (испускательная способность АЧТ, плотность энергии излучения, спектральная мощность излучения, яркость источника и т.д.) На практике это затрудняет надежный расчет и интерпретацию получаемых результатов.

1. Уровни тепловых радиосигналов

В физической литературе закон Планка относят к трём различным физическим величинам:

- к объёмной плотности теплового электромагнитного излучения;
- к так называемой яркости источника излучения, определение которой связано с приемом излучения, содержащегося в телесных углах;
- к мощности теплового излучения единицы поверхности АЧТ.

Вид формул и размерностей, описывающих закон Планка, определяется выбранной физической величиной и предпочтительной для конкретных условий шкалой для отображения переменной величины. С радиотехнической точки зрения удобно и оказывается вполне достаточным ограничиться последним вариантом характеристики излучения, а в качестве шкал использовать либо шкалу частот, либо шкалу длин волн. Для шкалы частот согласно, например, [1-4], формула Планка имеет следующий вид:

$$P(f, T) = \frac{2\pi hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \quad (1)$$

где: h - постоянная Планка, равная $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с,
 k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,
 T - абсолютная температура АЧТ К,
 c - скорость света,
 f - частота, о смысле которой будет сказано ниже.

Размерность величины, описываемой уравнением (1), равна Дж м⁻². Если учесть, что эту величину в случае использования размерностей повсеместно относят к элементарному интервалу частот в 1 Гц, то размерность становится Дж·м⁻²·с=Вт·м⁻²·с², что вызывает ещё большее недоумение. Автором настоящей работы предложено [5,6] исправить положение следующим образом. Предлагается уравнение (1) рассматривать в качестве плотности некоторого одномерного статистического распределения, в котором непрерывной случайной величиной является частота f , а T - является параметром распределения. Тогда $P(f, T)$ следует рассматривать как среднее по времени значение мощности, излучаемой одним квадратным метром поверхности АЧТ, которая приходится на бесконечно узкую полосу частот df , причём эта полоса df «центрирована» относительно некоторой частоты f . Тогда размерность величины $P(f, T)$ становится естественной и имеет вид Вт·м⁻². Поэтому закон излучения Планка, по нашему мнению, целесообразно записывать в следующем виде:

$$dP(f, T) = \frac{2\pi hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \cdot df \quad (2)$$

Функция $P(f, T)$ описывает спектральную плотность излучения АЧТ по шкале частот. Спектральная плотность излучения по шкале частот имеет максимум. Частота f_m , соответствующая этому максимуму, определяется выражением:

$$f_m = 0,5875 \cdot 10^{11} \text{Т} \quad [\text{Гц}] \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает закон смещения Вина по шкале частот. В литературе иногда встречается ошибочное значение (например, в [7], ф-ла 1.5), равное $1,03 \cdot 10^{11}$ Т. Полученное при формальном механическом делении скорости света на ординату максимума излучательной способности по шкале длин волн, оно фактического смысла не имеет.

В радиотехнике, где $hf \ll kT$, обычно пользуются законом Планка в виде приближения Релея-Джинса, при получении которого экспонента в (1) и (2) заменяется двумя первыми членами её разложения в степенной ряд. Тогда выражение (2) переписывается в следующем виде:

$$dP(f, T) = \frac{2\pi k T f^2}{c^2} \cdot df \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (4)$$

Конкретная радиометрическая аппаратура проектируется на приём сигналов в определённой полосе частот от f_1 до f_2 . Теперь мы можем найти эквивалентную, которую можно назвать располагаемой, мощность теплового радиоизлучения в ваттах, излучаемую квадратным метром поверхности АЧТ.

$$P_{\text{расч}}(f_1, f_2, T) = \frac{2\pi k T}{c^2} \cdot \int_{f_1}^{f_2} f^2 df = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi k T}{c^2} (f_2^3 - f_1^3) \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (5)$$

2. Уровни излучения на шкале длин волн

Для перехода от частотного диапазона к диапазону длин волн на первый взгляд представляется, что достаточно заменить частоту f в выражениях (1) и (2) на величину c/λ . Однако при этом получается несуразная размерность и зависимость уровня излучения от длины волны вида λ^2 . Именно такая замена привела к появлению повсеместно распространенной ошибки в радиотехнической литературе. Дело, однако, обстоит сложнее. Так как мы рассматриваем закон Планка в качестве статистического распределения, то здесь следует применять процедуру, которая используется при функциональных преобразованиях случайной величины в статистических законах распределения. Такая процедура описана, например, в [8]. В соответствии с ней помимо замены f на c/λ результат необходимо умножить на $\left| \frac{df}{d\lambda} \right| = \frac{c}{\lambda^2}$. В результате этого мы получаем следующий аналог выражения (2) для области длин волн:

$$dP(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda \quad (6)$$

Величину, описываемую этим уравнением, можно назвать плотностью излучения АЧТ по шкале длин волн. Закон смещения Вина по шкале длин волн хорошо известен:

$$\lambda_m = 0,0029 \cdot T^{-1} \quad [M] \quad (7)$$

Легко видеть, что $f_m \cdot \lambda_m \neq c$, что неудивительно, если принять во внимание, что λ_m и f_m соответствуют совершенно разным по своему физическому смыслу функциям.

В приближении Релея-Джинса уравнение (6) будет выглядеть следующим образом:

$$dP(\lambda, T) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} d\lambda \quad \left[\frac{Bm}{M^2} \right] \quad (8)$$

Если радиометрическая аппаратура проектируется на приём теплового излучения в диапазоне волн от λ_1 до λ_2 , то мы можем вновь найти эквивалентную для этого случая мощность теплового излучения в ваттах, излучаемую квадратным метром поверхности АЧТ:

$$P_{расч}(\lambda_1, \lambda_2, T) = 2\pi ckT \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^4} = 2\pi ckT \left(\frac{1}{\lambda_2^3} - \frac{1}{\lambda_1^3} \right) \quad \left[\frac{Bm}{M^2} \right] \quad (9)$$

Очевидно, что мощность излучения, содержащаяся в диапазоне частот f_1 до f_2 равна мощности, приходящейся на диапазон волн от $\lambda_1 = \frac{c}{f_1}$ до $\lambda_2 = \frac{c}{f_2}$. Можно показать, что существует следующее интегральное тождество, справедливое при любом n :

$$\int_{x_1}^{x_2} x^n dx \equiv a^{n-1} \int_{\frac{a}{x_1}}^{\frac{a}{x_2}} \frac{dx}{x^{n-2}} \quad x_1, x_2 > 0, \quad n \in Z. \quad (10)$$

На основании этого тождества при $a=c$ и $n=2$ подтверждается равенство мощностей, получаемых по (2) и (8). Можно заметить, что равенство мощностей теперь получается также заменой в формуле (8) λ_1 на c/f_1 и λ_2 на c/f_2 , что лишь подтверждает правильность использованного подхода к проблеме.

3. Поляризационные характеристики и характеристики направленности

На достаточном удалении от поверхности АЧТ излучаемая электромагнитная

волна является сферической волной с хаотической поляризацией. Иногда говорят о неполяризованном излучении. Всё же следует отметить, что в данном случае в фиксированный момент времени и в определённой точке пространства имеется некоторое определённое состояние поляризации электромагнитного поля. Так как все состояния поляризации равновероятны, то очевидно, что на выходе любой конкретной приёмной антенны появится только половина той средней мощности, которая могла бы иметь место при полном согласовании поляризационных состояний собственно приёмной антенны и падающего на неё поля.

При всех определениях АЧТ [9] оказывается, что излучение элемента поверхности АЧТ сосредоточено в передней полусфере, т. е. заполняет телесный угол 2π стерадиан, а плотность потока мощности изменяется пропорционально $\cos \theta$, где θ - угол между нормалью к поверхности АЧТ и направлением на точку регистрации излучения. Поэтому можно считать, что вклад в результирующий принимаемый сигнал вносят только те участки поверхности АЧТ, которые наблюдаемы из точки приёма.

4. Энергетические характеристики линии радиотеплолокации

Рассмотрим случай точечной цели-излучателя, когда угловые размеры цели много меньше ширины луча приёмной антенны. Очевидно, что в рассматриваемом случае линия связи представляет собой линию обычной радиосвязи или линию радиолокации с активным ответом. Схема такой линии в свободном пространстве показана на рис. 1.

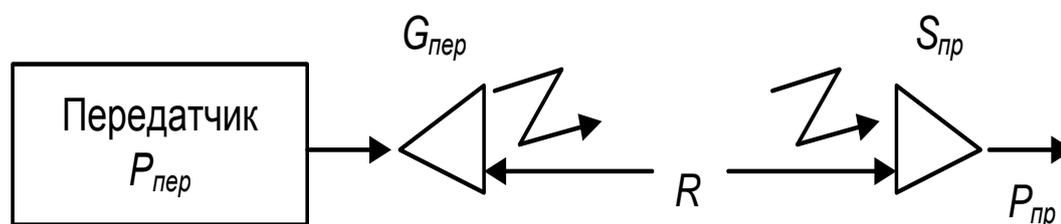


Рис. 1. Схема линии радиосвязи

Хорошо известно, что мощность на выходе приёмной антенны при условии взаимной юстировки передающей и приёмной антенн описывается формулой

$$P_{пр} = \frac{P_{пер} G_{пер} S_{пр}}{4\pi R^2} \quad (11)$$

где $P_{пр}$ - принимаемая мощность ($Вт$);

$P_{пер}$ - мощность подводимая к передающей антенне (мощность передатчика) ($Вт$);

$G_{пер}$ - коэффициент усиления передающей антенны («разы»);

$S_{пр}$ - приёмная площадь приёмной антенны ($м^2$);

R - расстояние между излучателем и приёмником ($м$)

Предлагаемая методика расчёта радиолинии основывается на этой формуле. При этом вводятся понятия эквивалентной мощности передатчика $P_{пер экв}$ и коэффициента усиления некоторой виртуальной передающей антенны $G_{вирт}$. На рис. 2 показана эквивалентная схема АЧТ, которое предлагается рассматривать в виде совокупности передатчика и передающей антенны.



Рис. 2. Абсолютно чёрное тело и его эквивалентная схема

Эквивалентная мощность передатчика может быть найдена суммированием излучаемой мощности всех элементов поверхности АЧТ, наблюдаемых из точки приёма. При этом необходимо учитывать описанные выше направленные свойства теплового излучения. Эта эквивалентная излучаемая мощность равна произведению проекции АЧТ на плоскость, перпендикулярную направлению на точку приёма, на эквивалентную мощность теплового излучения одного квадратного метра поверхности АЧТ. Другими словами, мощность теплового излучения АЧТ произвольной формы, регистрируемая в отдалённой точке, равна мощности теплового излучения абсолютно чёрной плоской фигуры (АЧФ), получающейся в результате проекции АЧТ на соответствующее направление. Площадь этой абсолютно чёрной фигуры обозначим через $S_{\text{ц}}$. Схематически это показано на рис. 3.

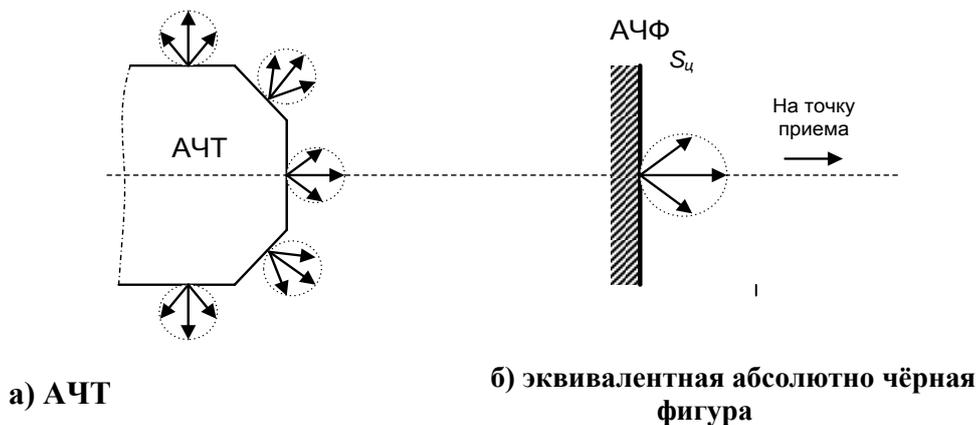


Рис.3. АЧТ и эквивалентная абсолютно чёрная фигура

Таким образом,

$$P_{\text{пер экв}} = P_{\text{расп}} \cdot S_{\text{ц}} \quad [Вт] \quad (12)$$

При этом $P_{\text{расп}}$ определяется формулой (5) при оперировании диапазоном принимаемых частот и формулой (9) при использовании в энергетическом расчёте диапазона длин волн.

Перейдём к рассмотрению свойств виртуальной передающей антенны. Очевидно (см. разд. 1.3.), что её излучение описывается однолепестковым лучом с осевой симметрией. Диаграмма направленности этой антенны по мощности описывается функцией $\cos \theta$, где θ - угол, отсчитываемый от максимума. Из теории антенн хорошо известно, что коэффициент направленного действия антенны может быть найден посредством интегрирования её пространственной диаграммы. В данном случае расчёт даёт значение, равное 4. В введённой виртуальной антенне какие-либо энергетические

потери отсутствуют, так как её можно полагать идеально согласованной как со стороны АЧТ, так и со стороны свободного пространства. В ней отсутствуют и омические потери. Поэтому можно считать, что на любой частоте её коэффициент усиления равен 4. Более того, оказывается, что максимум излучения виртуальной антенны всегда направлен в точку приёма. Зависимость же принимаемой мощности от ракурса цели-излучателя автоматически учитывается изменением её проекции. Таким образом, введение виртуальной антенны помимо прояснения существа процессов в линии связи направлено на достижение правильной нормировки уровня принимаемой мощности.

Теперь формулу связи по аналогии с (11) можно записать в виде произведения следующих сомножителей:

$$P_{np} = \frac{2}{3} \frac{\pi k T}{c^2} (f_2^3 - f_1^3) S_u \cdot 4 \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot S_{np} \cdot 0,5 \quad (13)$$

В этой формуле первый сомножитель выражает мощность эквивалентного виртуального передатчика, второй - коэффициент усиления передающей антенны, третий сомножитель отражает ослабление плотности потока мощности при распространении сферической волны в свободном пространстве. Четвёртый сомножитель характеризует качество приёмной антенны, а пятым коэффициентом учитываются неизбежные поляризационные потери при приёме излучения. В более компактном виде уравнение (13) имеет вид:

$$P_{np} = \frac{kT(f_2^3 - f_1^3) \cdot S_u \cdot S_{np}}{3c^2 P_{np.мин}} \quad (14)$$

Если положить, что принимаемая мощность равна чувствительности приёмного канала $P_{np.мин}$, мы получаем уравнение для дальности действия радиотеплолокатора при использовании шкалы частот:

$$R_{макс} = \sqrt{\frac{kT(f_2^3 - f_1^3) \cdot S_u \cdot S_{np}}{3c^2 P_{np.мин}}} \quad [M] \quad (15)$$

Аналогичное уравнение при использовании шкалы длин волн имеет вид:

$$R_{макс} = \sqrt{\frac{ckT\left(\frac{1}{\lambda_2^3} - \frac{1}{\lambda_1^3}\right) \cdot S_u \cdot S_{np}}{P_{np.мин}}} \quad [M] \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) могут рассматриваться применительно к радиотеплолокации в качестве аналогов так называемого основного уравнения радиолокации с пассивным ответом, например в [10]. Следует иметь в виду, что основным уравнениям свойственны общие ограничения и недостатки. В них не учитываются условия распространения радиоволн, статистический характер процедуры обнаружения сигналов, особенности сканирования луча антенны в пространстве, конкретная помеховая обстановка и т.п. Тем не менее эти уравнения являются прозрачными для истолкования и не вызывают каких-либо проблем при грубых расчётах дальности действия той или иной системы, а также при оценке степени влияния того или иного параметра на дальность действия.

Заключение

1. В работе предлагаются уточнения, связанные с инженерным использованием закона излучения Планка.

2. На основании этого в приближении Релея-Джинса получены более точные и согласующиеся между собой формулы для расчёта эффективной энергии теплового радиоизлучения как применительно к диапазону длин волн, так и применительно к

диапазону рабочих частот.

3. Для инженерного расчёта энергетических характеристик линии связи предложено ввести в схему линии фиктивный передатчик с эквивалентной выходной мощностью, а также виртуальную передающую антенну с коэффициентом усиления, не зависящим от частоты и ракурса цели-излучателя. Предложены простые методики расчёта эквивалентной мощности передатчика и коэффициента усиления виртуальной антенны.

4. Получена формула для дальности действия радиотеплолокатора, аналогичная основному уравнению радиолокации и уравнению противорадиолокации.

5. Приведённое в работе интегральное тождество (10) может оказаться полезным при решении смежных задач радиотехники и радиофизики (в системах радиотехнической разведки, широкополосной связи и т.п.).

Литература

1. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, 7 ed, vol.2, p.2230.e
2. Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik, Verlag "Moderne Industrie", s.3339
3. Д.В.Сивухин. Оптика. М. «Наука», 1980, стр.700
4. «Электроника». Энциклопедический словарь. М. «Советская энциклопедия», 1991, стр.389
5. Титов А.Н. М. расчет характеристик радиоволновоо излучения абсолютно черного тела. Антенны. Вып 9 (136), 2008 г., стр. 110-112
6. Titov A.N. Black Body as an Antenna and Transmitter Combination. Int. Conf/ on Antenna Theory and Techniques, 2009, Lviv, pp. 242-243
7. Л.Т. Гучков. Естественные шумовые излучения в радиоканалах. М. Соврадио, 1968, ф-ла (1.5)
8. Б.Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн.1. М. Соврадио, 1974, разд. 3.1
9. Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский. Рассеяние волн «чёрными» телами. М. Соврадио, 1972
10. Радиоэлектронные системы под ред. Я.Д. Ширмана. М. «Радиотехника», 2007, разд.