

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 629.7.023.24

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА АНТЕННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Гюльмагомедов Несреддин Ханмагомедович

аспирант Национального исследовательского университета
«Московский Энергетический Институт» (НИУ «МЭИ»).

E-mail: nesred@rambler.ru.

Лукашенко Юрий Иванович

кандидат технических наук, профессор Национального исследовательского университета
«Московский Энергетический Институт» (НИУ «МЭИ»).

E-mail: LukashenkoUI@mpei.ru.

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 11.

Аннотация: В данной статье рассмотрено влияние нагрева обтекателя антенны радиолокационной станции на её характеристики. Особое внимание уделено теоретическим расчётам по оценке изменения дальности радиолокационной станции при нагреве радиопрозрачного обтекателя. Представлены оценочные формулы, позволяющие рассчитать динамическое изменение не только шумовых характеристик обтекателя, но и активные потери, возникающие при нагреве. Выведены формулы, связывающие активные потери в обтекателе с параметрами радиолокационной станции. По полученным теоретическим выкладкам проведена оценка влияния равномерного нагрева обтекателя на дальность действия радиолокационной станции. С этой целью были проведены измерения диэлектрических характеристик образцов спутников обтекателя. На основе анализа полученных результатов установлено, что: 1) увеличение температуры на поверхности обтекателя влечёт за собой изменение диэлектрических характеристик материала, из которого изготовлен сам обтекатель; 2) активные потери, возникающие в обтекателе при нагреве, снижают мощность сигнала при прохождении стенки обтекателя, вследствие чего происходит снижение дальности действия радиолокационной станции. Полученные результаты являются необходимой основой для дальнейших исследований влияния внешних факторов на характеристики обтекателей радиолокационных станций.

Ключевые слова: радиолокационная станция, обтекатель, высокотемпературный нагрев, затухание сигнала, потери в обтекателе.

1. Введение

Диэлектрические материалы, предназначенные для изготовления обтекателей для защиты антенны радиолокационной станции (РЛС) от внешних воздействующих факторов, должны обладать особыми свойствами. Обтекатель, в идеальном случае, должен обеспечить полную защиту антенны РЛС от влияния внешних воздействий, совершенно не искажая при этом её характеристик [1].

Немаловажную часть при создании обтекателя также уделяют геометрической форме. Наиболее часто используемым обтекателем

является так называемый носовой (остроконечный) обтекатель. Наличие остроконечного обтекателя приводит к ослаблению мощности полезного сигнала и появлению ошибки в определении направления на цель. Влияние остроконечного и, как правило, симметричного обтекателя конической или оживальной формы на характеристики излучения антенны особенно ощутимо при воздействии внешних факторов [2–4].

Опыт эксплуатации и многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показали, что обтекатели, изготовленные даже

из самых стабильных диэлектрических материалов с высокой точностью, заметно изменяют характеристики излучения защищаемых ими антенн РЛС.

2. Методика оценки влияния нагрева обтекателя на характеристики РЛС

Дальность действия РЛС является одной из важнейших характеристик большинства радиосистем. Под дальностью действия понимают максимальное расстояние $R = R_{max}$, на котором мощность принимаемого полезного сигнала достигает минимально допустимого порогового уровня $P_c = P_{пр}$, достаточного для выполнения системой основных функций с качественными показателями, не хуже заданных.

Дальность действия РЛС определяется выражением [5]

$$R_{max} = \sqrt{\frac{S_{эфф}^4 \cdot P_{прд} \cdot \sigma_{ц}}{2 \cdot \lambda \cdot P_{с.мин} \cdot \pi}}, \quad (1)$$

где $S_{эфф}$ – эффективная площадь приёмно-передающей антенны; λ – длина волны; $P_{прд}$ – мощность передатчика в импульсе; $\sigma_{ц}$ – эффективная отражающая поверхность цели; $P_{с.мин}$ – пороговая чувствительность приёмного устройства.

Для определения порогового сигнала $P_{с.мин}$ необходимо знать характеристики сигнала и помех, заданные значения вероятностей правильного обнаружения D и ложной тревоги F [6].

Если считать, что помеха представляет собой белый шум с равномерной односторонней спектральной плотностью N_0 , удобно использовать минимально допустимое пороговое отношение сигнал/шум q_{min} . Используя q_{min} можно переписать формулу (1)

$$R_{max} = \sqrt{\frac{S_{эфф}^4 \cdot P_{прд} \cdot T_{нак} \cdot \sigma_{ц}}{2 \cdot \lambda \cdot N_0 \cdot \pi \cdot L_{п} \cdot q_{min}^2 / 2}}, \quad (2)$$

где $T_{нак}$ – время когерентного накопления сигнала в приёмном тракте; $L_{п}$ – коэффициент, учитывающий возможные потери.

Односторонняя спектральная плотность бе-

лого шума N_0 связана с полной шумовой температурой системы $T_{ш}(^{\circ}k)$ и постоянной Больцмана k выражением

$$N_0 = k \cdot T_{ш}. \quad (3)$$

Полная шумовая температура системы равна полной шумовой температуре антенны T_a и шумовой температуре фидерной линии $T_{ф}$. В свою очередь шумовая температура антенны равна сумме отдельных составляющих

$$T_a = T_{погл} + T_3 + T_s + T_{обт}, \quad (4)$$

соответствующих следующим источникам шума: $T_{погл}$ – шумовая температура за счёт поглощения в атмосфере; T_3 – шумовая температура за счёт диффузного излучения среды; T_s – шумовая температура, пропорциональная шумам Солнца; $T_{обт}$ – шумовая температура за счёт влияния обтекателя [7, 8].

Систему «антенна – обтекатель» можно заменить эквивалентным излучающим раскрывом (рис. 1), учитывающим влияние обтекателя и характеризующимся величиной активного затухания – α и коэффициентом отражения $|R|$ на входе эквивалентной антенны [2]. Эквивалентный раскрыв представляет собой плоскость I-I, вынесенный за обтекатель с пересчитанными амплитудными и фазовыми распределениями.

При нагреве обтекателя резко возрастает шумовая температура антенны за счёт роста парциальной шумовой составляющей, обу-

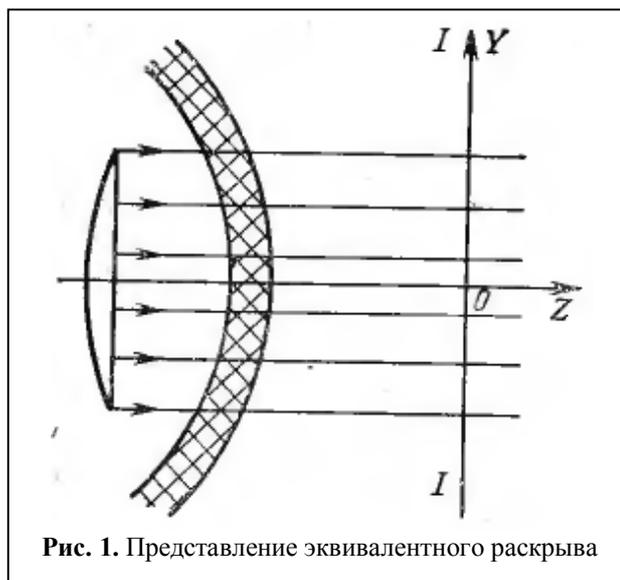


Рис. 1. Представление эквивалентного раскрыва

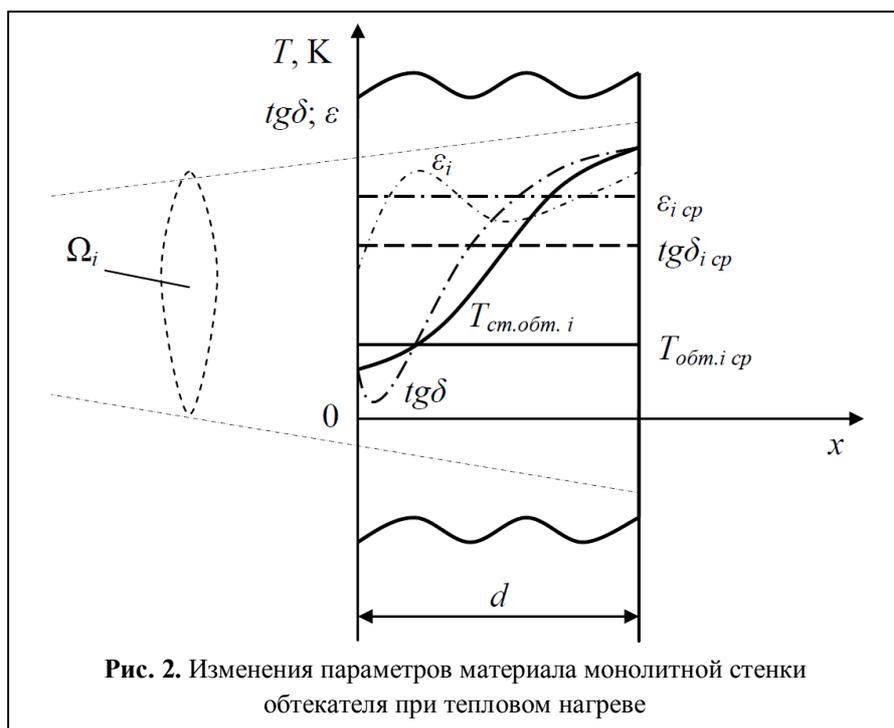


Рис. 2. Изменения параметров материала монолитной стенки обтекателя при тепловом нагреве

Поскольку форма радиопрозрачного обтекателя определяется требуемыми аэродинамическими параметрами, то угол падения электромагнитной волны на стенку обтекателя отличается от нормального, и это необходимо учитывать при точных расчётах [9].

Переходя к интегральной сумме и считая параметры эквивалентной антенны в пределах телесного угла Ω_i зависимыми от двух координат θ и φ , характеризующих сектор излучения, уравнения (5), (6), (7) и (8) можно пере-

словенной влиянием нагретого обтекателя.

Разбивая весь объём эквивалентного раскрыва на m элементарных телесных углов Ω , можно записать для i -го угла выражение для составляющей шумовой температуры в связи с активными потерями в материале стенки [2]

$$T_{a.пот.i} = (1 - \alpha_i) \cdot T_{ст.обт.i}, \quad (5)$$

где $T_{ст.обт.i}$ – усреднённая температура стенки обтекателя при тепловом нагреве в элементарном телесном угле Ω_i .

Шумовая температура за счёт излучения шумовой мощности нагретым обтекателем записывается в виде

$$T_{a.изл.i} = \alpha_i \cdot T_{ст.обт.i}. \quad (6)$$

Шумовая температура за счёт диффузного излучения от стенки обтекателя составит величину

$$T_{a.отр.i} = |A_i|^2 \cdot |R_i| \cdot T_{ст.обт.i}, \quad (7)$$

где A_i – относительная амплитуда поля в пределах телесного угла Ω_i .

В случае нормального угла падения и полуволновой толщины стенки обтекателя с диэлектрической проницаемостью ϵ и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg \delta$

$$\alpha_i \approx \frac{\pi}{2} \cdot \left[\epsilon_i + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} \right] \cdot tg \delta_i. \quad (8)$$

писать в следующем виде:

$$T_{a.пот.} = \frac{T_{ст.обт.i}}{S} \iint [1 - \alpha(\varphi, \theta)] dS, \quad (9)$$

$$T_{a.отр.} = \frac{T_{ст.обт.i}}{S} \iint |A(\varphi, \theta)|^2 \cdot |F(\varphi, \theta)| dS, \quad (10)$$

$$T_{a.изл.} = \frac{T_{ст.обт.i}}{S} \iint \alpha(\varphi, \theta) dS, \quad (11)$$

$$\alpha_i \approx \frac{\pi}{2 \cdot S} \cdot \iint \left[\epsilon(\varphi, \theta) + \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\varphi, \theta)}} \right] \times tg \delta(\varphi, \theta) dS. \quad (12)$$

В уравнениях (9)–(12) S – поверхность раскрыва эквивалентной антенны.

Введём коэффициент $q_{ш}$, учитывающий относительное увеличение мощности шумов при тепловом нагреве [2]

$$q_{ш} = \frac{N_{0.нагр}}{N_0} = \frac{T_{ш.нагр}}{T_{ш}} > 1, \quad (13)$$

где $N_{0.нагр}$ – односторонняя спектральная плотность белого шума системы, когда обтекатель испытывает тепловой нагрев. Рост потерь в стенке обтекателя при его нагреве приводит к уменьшению мощности излучения за стенкой обтекателя и к уменьшению эффективной площади антенны при тепловом нагреве [10]. Мощность излучения будет иметь значение

$$P_{\text{прд.нагр}} = P_{\text{прд}}(1 - \alpha_{\text{нагр}}), \quad (14)$$

а эффективная площадь антенны

$$S_{\text{эфф.нагр}} = S_{\text{эфф}}(1 - \alpha_{\text{нагр}}), \quad (15)$$

где $\alpha_{\text{нагр}}$ – затухание в стенке нагретого обтекателя.

Обобщая вышеприведённые рассуждения, можно представить дальность действия РЛС при тепловом нагреве в следующем виде [4]:

$$R_{\text{max.нагр}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha_{\text{нагр}})^3}{q_{\text{ш}}}} \sqrt{\frac{S_{\text{эфф}}}{2 \cdot \lambda}} \times \sqrt[4]{\frac{P_{\text{прд}} \cdot T_{\text{нак}} \cdot \sigma_{\text{ц}}}{N_0 \cdot \pi \cdot L_{\text{п}} \cdot q_{\text{min}}^2 / 2}} < R_{\text{max}}. \quad (16)$$

Это выражение отличается от выражения (2) наличием первого множителя, величина которого всегда меньше единицы. Именно данный множитель и учитывает влияние нагрева на рост потерь при расчёте дальности действия РЛС.

3. Оценка влияния нагрева обтекателя на дальность действия РЛС

Для апробации вышеописанного метода оценки влияния нагрева на дальность действия РЛС были проведены следующие теоретические расчёты.

Ввиду того, что большое количество существующих современных РЛС работает в диапазоне X, расчёты проведены для радиолокационной станции, работающей на длине волны $\lambda = 3$ см.

Для удобства, шумовая температура была принята равной $T_{\text{ш}} = 293$ K, а дальность действия РЛС $R = 100$ км.

В качестве обтекателя, подвергающегося тепловому нагреву, был выбран полуволновый монолитный обтекатель. Обтекатель изготовлен из стеклопластика на основе кремнийорганической смолы.

Для данного обтекателя экспериментальным путём на плоских образцах – спутниках были измерены значения диэлектрических характеристик (диэлектрическая проницаемость ε , тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$)

для двух случаев:

- при нормальных условиях ($T_{\text{ст.обт}} = 293$ K) – $\varepsilon = 3,62$ и $tg \delta = 0,01$;

- при равномерном нагреве до температуры ($T_{\text{ст.обт}} = 1093$ K) – $\varepsilon_{\text{нагр}} = 3,48$ и $tg \delta_{\text{нагр}} = 0,05$.

Измерения проводились на объёмном цилиндрическом резонаторе согласно ГОСТ Р 8.623-2015 «Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот» двумя методами: а) при фиксированной резонансной частоте; б) при фиксированной резонансной длине.

Коэффициент $q_{\text{ш}}$, рассчитанный по формуле (13), равен 4,2, а величина активного затухания $\alpha_{\text{нагр}} = 0,31$.

Подставляя полученные значения в формулу (16) было рассчитано, что дальность действия РЛС, при равномерном тепловом нагреве обтекателя до температуры $T_{\text{ст.обт}} = 1093$ K снизилась до значения $R_{\text{max.нагр}} = 53$ км.

4. Заключение

Анализ полученных теоретических результатов показал, что равномерный нагрев монолитного обтекателя с полуволновой толщиной стенки до температуры, равной $T_{\text{ст.обт}} = 1093$ K, привёл к снижению дальности действия РЛС почти в два раза.

В реальном случае температура обтекателя меняется вдоль его образующей и, следовательно, дальность действия РЛС будет различна для различных углов отворота луча антенны. Для выявления динамической зависимости изменения параметров стенки обтекателя вдоль образующей при неравномерном нагреве необходимы дополнительные исследования.

Как видно, изменения физических параметров стенки антенного обтекателя при его нагреве в конечном итоге приводят к существенному уменьшению дальности действия РЛС. Следовательно, условия эксплуатации РЛС, размещаемых под радиопрозрачным обтекателем

лем, необходимо учитывать при их проектировании.

Литература

1. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ (Расчёт и проектирование). М.: Сов. радио, 1974. 240 с.
2. Воронин М.Я., Карманов И.Н., Кошелев А.В., Носков М.Ф., Лесных И.В., Миценко И.Д., Ушаков О.К. Физика нагрева СВЧ-диэлектриков летательных аппаратов и их защита: монография. Новосибирск: СГГА, 2008. 156 с.
3. Гуртовник И. Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2003. 368 с.
4. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 288 с.
5. Кобзарев Ю.Б. Современная радиолокация. М.: Сов. радио, 1969. 699 с.
6. Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. Локационные методы исследования объектов и сред: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 384 с.
7. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур. М.: Сов. радио, 1977. 206 с.
8. Воронин М.Я., Снякин А.К., Устюгов М.Б. Внешние и внутренние воздействия на оптико-радиоэлектронные приборы и их испытание: монография. Ч. 1. Новосибирск: СГГА, 2004. 76 с.
9. Василенко В.В., Карпов Я.С., Кривенда С.П. и др. Технология изготовления обтекателей из композиционных материалов. Харьков: «ХАИ», 2005. 48 с.
10. Оводенко А.А., Красюк В.Н., Бестугин А.Р., Рыжиков М.Б. Радиозаметность антенных окон гиперзвуковых летательных аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. Санкт-Петербург. Т. 54. № 8. 2011. С. 5–11.

Поступила 4 апреля 2019 г.

English

HEATING EFFECT OF ANTENNA RADOME ON RADAR PERFORMANCE

Nesreddin Khanmagomedovich Gulmagomedov – Graduate Student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI").

Email: nesred@rambler.ru.

Yuriy Ivanovich Lukashenko – Candidate of Technical Sciences, Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI").

Email: LukashenkoUI@mpei.ru.

Address: 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14.

Abstract: Field experience and numerous theoretical and experimental research made it clear that radomes made of even the most stable dielectric materials with high accuracy significantly change the radiation properties of the radar antennas protected by them. The main reason for the changes in the radar properties is the change in the radome physical properties at high temperature heating. The article proposes to assess the heating effect of the radar radome on radar range variation. Dielectric properties of the material do not change for the better due to changes in the physical properties of radome wall material. As a result, there is an increase in the electromagnetic wave attenuation when passing through radome wall. Author-developed methods enable to perform radar range dynamic analysis with radome at high temperature heating. The methods provide not only evaluation formula to calculate the range dynamic change but to calculate also resistance losses arising from heating. The derived formulas relate resistance losses in radome to the radar parameters. The obtained theoretical calculations to assess the effect of radome uniform heating on the radar detection range demonstrated the following: 1) Temperature rise on the radome surface entails a change in dielectric properties of the material from which the radome itself is made. 2) Resistance losses arising in the radome during heating reduce the signal power when passing through the radome wall, resulting in reduction of the radar detection range. The obtained results make a necessary framework for further research of the external influence on radar radome properties.

Keywords: radar station, radome, high-temperature heating, signal attenuation, losses in radome.

References

1. *Kaplun V.A.* Microwave antenna radomes (Calculation and engineering). Moscow: Sov. radio, 1974. 240 p.
2. *Voronin M.Ya., Karmanov I.N., Koshelev A.V., Noskov F.M., Lesnykh I.V., Mytsenko I.D., Ushakov O.K.* Heating physics of microwave dielectrics for airborne vehicles and their protection: monograph. Novosibirsk: SSUGT, 2008. 156 p.
3. *Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N.* et al. Radio-transparent glass-reinforced plastic products. Moscow: Mir, 2003. 368 p.
4. *Prigoda B.A., Kokunko V.S.* Airborne vehicle radomes. Moscow: Mechanical Engineering, 1970. 288 p.
5. *Kobzarev Yu.B.* Modern radar detection. Moscow: Sov. radio, 1969. 699 p.
6. *Baskakov A.I., Zhutyaeva T.S., Lukashenko Yu.I.* Location research methods of objects and media: textbook for students of higher vocational education institutions. Moscow: Publishing center "Academy", 2011. 384 p.
7. *Vorobyov E.A., Mikhailov V.F., Kharitonov A.A.* Microwave dielectrics at high temperatures. Moscow: Sov. radio, 1977. 206 p.
8. *Voronin M. Ya., Sinyakin A.K., Ustyugov M.B.* External and internal influences on optoelectronic devices and their testing: monograph. Part 1. Novosibirsk: SSGA, 2004. 76 p.
9. *Vasilenko V.V., Karpov Ya., S. Krivenda S.P.,* et al., Manufacturing technology of radomes made of composite materials. Kharkov: "KAI", 2005. 48 p.
10. *Ovodenko A.A., Krasnyuk, V.N., Bestugin A.R., Ryzhikov M.B.* Radio detectability of antenna windows of hypersonic aircrafts. News of Higher Educational Institutions. Instrument making. Saint-Petersburg. Vol. 54. No. 8. 2011. Pp. 5–11.