

МНОГОЧАСТОТНЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОБТЕКАТЕЛЯХ

Н.В. Самбуров

АО «Тайфун», г. Калуга

Измерение радиотехнических параметров конкретных экземпляров обтекателей для целей оценки качества диаграммообразования антенны РЛС является сложной с технической точки зрения задачей. Обтекатель часто располагается в ближней зоне и его влияние на диаграмму направленности антенны невозможно оценить обособленно. Для этого обычно используются либо расчетным способом, либо способом оценки диэлектрических свойств образца обтекателя. Ниже рассмотрены методы измерения потерь ЭМВ в обтекателях регулярного типа, проблемы их практической реализации, предложен ряд способов решения проблем, связанных с переотражениями. Предложен многочастотный способ нивелировки отражения от обтекателя при измерении потерь методом замещения.

Ключевые слова: обтекатель, измерение потерь, отражение, измерение, измерение характеристик обтекателя.

Введение

Для защиты антенных устройств радиолокационных станций (РЛС) от воздействий внешней среды используются различные радиопрозрачные изделия. По назначению и конструктивным особенностям различают: радиопрозрачные укрытия, окна и обтекатели. Главным электротехническим требованием к данным изделиям является требование внесения минимальных искажений ЭМВ (электромагнитной волны) при сохранении прочностных и защитных свойств. Ниже в качестве наименования объекта исследования будет использоваться именно «*обтекатель*», как наиболее распространенное и широко используемое понятие.

Целесообразность обособленного измерения радиотехнических параметров обтекателя для целей оценки качества диаграммообразования антенны РЛС является в какой-то мере вопросом спорным, по причине относительно близкого расположения обтекателя к раскрытию антенны. Наличие поверхностных волн и многократных отражений от поверхности обтекателя значительно искажают комплексную диаграмму направленности (ДН) и коэффициент усиления (КУ) системы антенна-обтекатель (САО) [1]. Степень влияния данных факторов зависит от типа обтекателя, а также от его расположения относительно антенны.

Для *регулярных обтекателей*, поверхность которых геометрически регулярна, а радиус кривизны много больше длины волны, преобладает влияние многократных отражений (переотражений) или *реакции*. В частности, форма ДН САО изменяется следующим образом: появляются «наплывы» и искажения на главном лепестке, смещаются «нули» и боковые лепестки ДН, падает КУ. Так на рис. 1 показан типичный пример неудачного согласования антенны и обтекателя регулярного типа: величина УБЛ возрасла на 8 дБ, главный лепесток ДН подвергся значительным искажениям на уровне –10 дБ. В некоторых случаях компенсация указанных паразитных эффектов требует существенной корректировки параметров САО вплоть до изменения конструкции самой антенны. Однако согласование антенны в составе САО ограничивает рабочий диапазон частот и возможности взаимного перемещения.

Вопрос об обособленном измерении радиотехнических параметров (в частности, потерь), является актуальным при разработке антенных систем, проведении технического контроля изготавливаемых обтекателей, исследовании их качества на объектах эксплуатации, а также при поиске неисправностей РЛС. Контролю (исследованию) должны подвергаться величины потерь и фазового набега электромагнитной волны по раскрытию. В ряде случаев для регулярных обтекателей достаточно контролировать только величину потерь. Этот параметр включает в себя как диссипативную, так и «отражательную» составляющую, и таким образом может являться параметром характеризующим искажение фазового фронта за счет нелинейного набега фаз, а значит и искажения ДН САО.

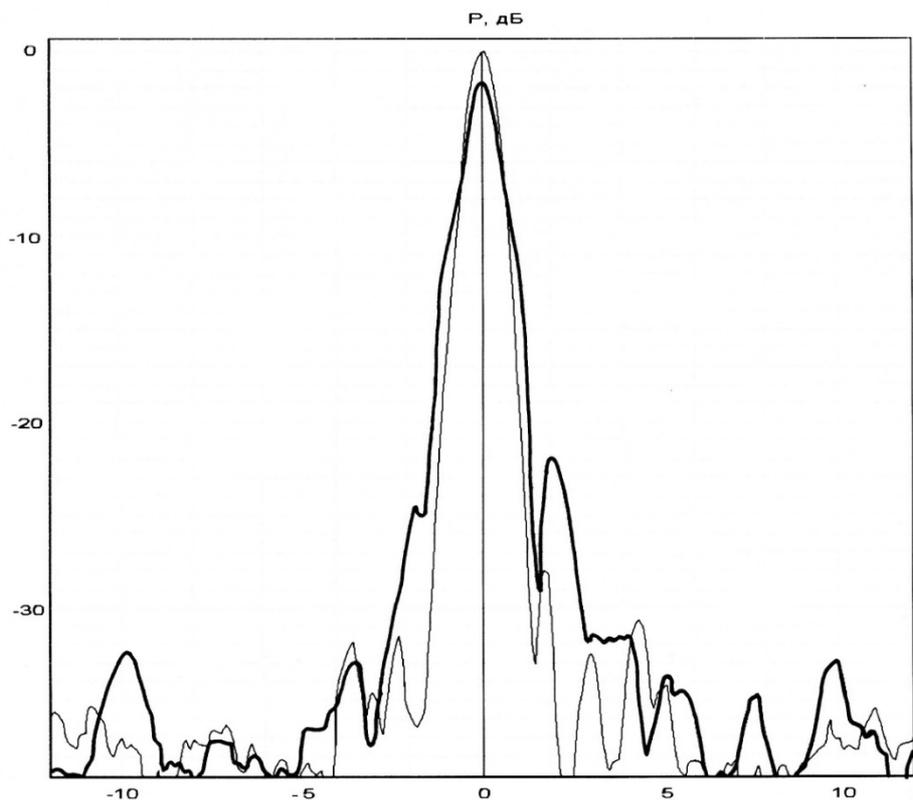


Рис. 1. ДН антенны (тонкая линия) и ДН САО (толстая линия).
Случай неудачного согласования антенны и обтекателя

Ниже будут рассмотрены методы измерения потерь (затухания) ЭМВ в обтекателях регулярного типа, проблемы их практической реализации, приведен ряд способов решения проблем, связанных с переотражениями. Также будет предложен многочастотный способ нивелирования отражения от обтекателя при измерении потерь методом замещения.

1. Методы измерения и оценки потерь. Методика измерения потерь методом замещения

Потери (затухания ЭМВ) являются универсальным параметром, характеризующим как качество изготовления обтекателей, так и качество используемых материалов. Потери в стенке обтекателя определяются следующим выражением [2]:

$$\Pi = 1 - |R|^2 - k_p, \quad (1)$$

где $k_p = \frac{P_{\text{дис}}}{P_0}$ – коэффициент диссипативных потерь по мощности; $|R|^2 = \frac{P_{\text{отр}}}{P_0}$ – коэффициент отражения по мощности.

Следует подчеркнуть, что величина коэффициента отражения $|R|^2$ абсолютна и постоянна по знаку. То есть величина потерь Π включает в себя диссипативные потери и потери на отражение, и не зависит от реакции между обтекателем и апертурой антенны.

В технической литературе уделяется мало внимания вопросам, связанным с замерах потерь в обтекателях. Поэтому следует рассмотреть ряд известных методов изучения электрических свойств материалов (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь), которые могут использоваться и для оценки потерь.

Так, известны резонансные, волновые и оптические методы, основанные на электрическом испытании технологических образцов (частей радиопрозрачной стенки), изготовленных в едином технологическом цикле с основным экземпляром. Однако данные методы больше подходят для оценки диэлектрических параметров используемых материалов, либо для обтекателей однослойной конструкции.

Другим, упрощенным методом контроля обтекателей, может служить метод, основанный на оценке величины коэффициента отражения от поверхности $|R|^2$. Очевидно, что при наличии неоднородностей, связанных с отклонением от технологии производства обтекателей, возрастает как коэффициент отражения $|R|^2$, так и потери Π . Вывод о годности изделия может быть сформулирован на основе сравнения величины коэффициента отражения от стенки испытуемого образца с коэффициентом отражения от аналогичной части эталонного обтекателя [3, с. 269]. Данный метод требует наличия полноценного эталона и не позволяет оценить абсолютную величину потерь Π . Также очевидно, что расстояние до обтекателя, позиционирование и ориентация антенны-зонда для испытуемого изделия и эталонного образца должны быть строго аналогичны, что создает конструктивно-технологические проблемы и вносит ограничения при организации и проведении измерений. По этой причине данный метод здесь также не будет рассмотрен.

Для испытания готовых экземпляров обтекателей часто используют метод замещения в поле плоской ЭМВ. Как правило, подобные испытания проводятся «штатно», в составе антенны и антенно-фидерного тракта РЛС, т. е. объектом исследований служит целиком САО. Подробно радиотехнические испытания САО описываются в специализированной литературе [3, 4].

Ниже будет приведена методика обособленного измерения радиотехнических параметров обтекателей. Обособленные испытания и испытания САО имеют сходства, так как основаны на едином методе, однако имеют и характерные различия; в частности, в вопросах требований к расстоянию до обтекателя, его размерам и ориентации.

Рабочее место в этом случае имеет сходство с рабочим местом для измерения коэффициента усиления антенн методом сравнения (другое название – метод замещения) [5]. Его схема представлена рис. 2.

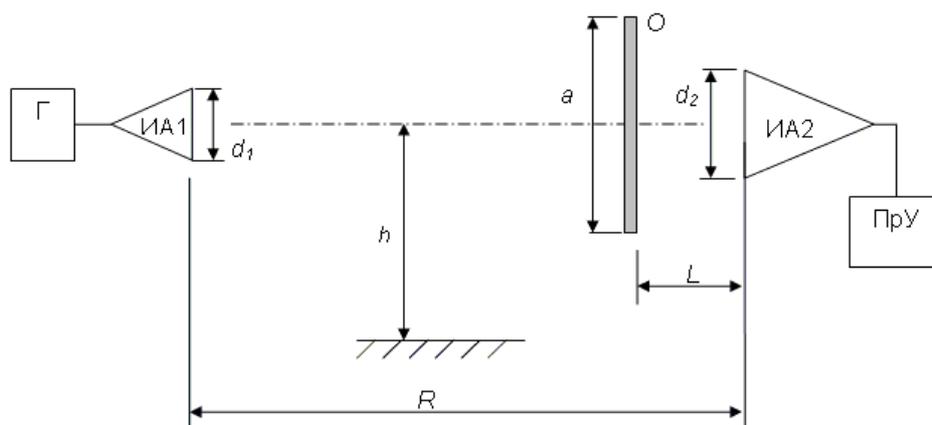


Рис. 2. Схема проведения измерений

Измерительная антенна ИА1, запитанная генератором Γ СВЧ-сигнала, создает в раскрыве антенны ИА2, расположенной на расстоянии R , условно плоский фронт волны. Общая методика проведения измерений следующая:

– производится настройка взаимной ориентации антенн ИА1 и ИА2 по критерию максимального сигнала $E_{\text{пр}0}$ на входе приемного устройства ПрУ, причем обтекатель O в зоне измерения отсутствует. Максимальный уровень сигнала $E_{\text{пр}0}$ фиксируется;

– в зону измерений вносится обтекатель O и фиксируется на расстоянии L от ИА2, соосно с линией визирования ИА1–ИА2. В случае необходимости производится установка необходимого (штатного) угла наклона обтекателя к линии визирования;

– отношение уровней сигналов на входе ПрУ до внесения обтекателя $E_{\text{пр}0}$ и после внесения $E_{\text{пр}}$ и будет определять потери в обтекателе:

$$\Pi = \frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}0}}.$$

Расстояние между антеннами R выбирается из неравенства

$$R \geq R_{\min} = \frac{2d^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где d – максимальный из размеров раскрывов d_1 и d_2 антенн ИА1 и ИА2 соответственно; λ – длина волны (минимальная из рабочего диапазона).

Расстояние h от линии визирования до плоской поверхности, формирующей первое побочное зеркальное отражение в направлении ИА2 (обычно расстояние до пола или стенок камеры), должно быть следующим:

$$h \geq h_{\min} = 0,6R \frac{\lambda}{d}. \quad (3)$$

Расстояние L от измерительной антенны ИА2 до обтекателя О выбирается из условия

$$L \leq L_{\min} = \frac{d_2 a}{2\lambda}, \quad (4)$$

где a – геометрический размер обтекателя.

Приведенные выше выражения получены на основе простых геометрических соотношений при условно плоской ЭМВ в раскрыве ИА2 (по критерию фазовой неравномерности менее $\lambda/16$ и спадающих амплитудных распределений) [3].

При практической реализации данного метода необходимо обеспечить стабильные значения уровня излучаемой мощности, характеристики приемных устройств и тракта, исключить отражения от сторонних предметов. Также желательно, чтобы размеры апертуры ИА2 и штатной антенны РЛС были близки.

Однако главная проблема при измерении затухания методом замещения – наличие отражений и переотражений ЭМВ от поверхности обтекателя, а, точнее, сопоставимость их величины с величиной потерь на обтекателе. В частности, величина потерь на отражение $|R|^2$ для распространенных обтекателей на основе сотовой конструкции может составлять порядка 0,5–1,0 дБ, что часто выше величины диссипативных потерь. Переотраженная ЭМВ в промежутке раскрыв антенны – обтекатель вызывает осцилляцию величины сигнала на выходе антенны в зависимости от расстояния и длины волны.

2. Некоторые способы борьбы с реакцией обтекателя

Влияние побочной отраженной волны на генератор измерительного устройства рассматриваться не будет, так как, во-первых, присутствующие фидерные тракты (например, коаксиальные линии) сами по себе в какой-то мере развязываются аттенуаторами, во-вторых, в современных измерительных приборах существует развязка генератора от отраженной волны. Поэтому рассмотрим реакцию только в промежутке раскрыв ИА2 – обтекатель О (см. рис. 2).

Для антенны ИА2 и обтекателя О ненормированная ДН САО $|F|^2$ для постоянной длины волны λ определяется следующим выражением [1]:

$$|F|^2 = E_0^2 M(L) |F_A|^2, \quad (5)$$

где E_0 – напряженность падающего на обтекатель поля; $|F_A|^2$ – множитель характеризующий ДН антенны ИА2; $M(L)$ – коэффициент модуляции.

Коэффициент модуляции $M(L)$ представляет собой периодическую функцию с периодом $\lambda/2$, абсолютная величина которой изменяется гармонически при изменении L . Таким образом, для антенн ИА1 и ИА2 с фиксированной ориентацией и положением сигнал на входе приемника $E_{\text{пр}}$ пропорционален величине $M(L)$:

$$E_{\text{пр}} \sim M(L).$$

Задача состоит в том, чтобы исключить влияние величины $M(L)$, а значит и расстояния до обтекателя L , на конечную величину Π .

Одним из решений задачи может являться вариация фазы отраженной волны с φ до $(\varphi + \pi)$, с последующим арифметическим усреднением измеренных величин затухания, другим – перенаправление отраженной волны мимо приемной антенны. Рассмотрим некоторые возможные способы реализации указанных решений:

1. *Способ, основанный на вариации расстояния до обтекателя.* Замеры производятся на двух расстояниях L : L_1 и L_2 (см. рис. 2), причем

$$L_2 = L_1 + \frac{\lambda}{4}.$$

Искомая величина потерь в данном случае находится следующим образом:

$$\Pi = \frac{E_{\text{пр}}(L_1) + E_{\text{пр}}(L_2)}{2E_{\text{пр}0}}. \quad (6)$$

2. *Способ, основанный на применении радиопрозрачной фазированной структуры.* Между обтекателем и ИА2 помещают однородную радиопрозрачную структуру – листовый диэлектрический материал толщиной l_M :

$$l_M = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon}},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала.

Важно, чтобы материал был ориентирован параллельно фронту падающей волны, потери в материале и величина ε были минимальны. Среднее арифметическое значение измеренных коэффициентов прохождения с материалом и без него и будет являться искомой величиной (расчет ведется по аналогии с первым методом по (6)).

3. *Способ организации двух противофазных измерительных каналов.* Для этой цели удобно использовать три измерительные антенны и восьмиполосный (либо шестиполосный) векторный анализатор цепей, соединенный с данными антеннами. Расстояние L от антенн до обтекателя должно отличаться на величину $\lambda/4$. Среднее арифметическое значение измеренных векторным анализатором S -параметров S_{21} и S_{31} и будет являться искомой величиной $E_{\text{пр}}$.

4. *Способ направления переотраженной ЭМВ мимо апертуры измерительной антенны.* Для исключения влияния переотраженной волны производится поворот нормали обтекателя O и направление отраженной ЭМВ мимо апертуры ИА2.

Главным недостатком первого способа являются повышенные требования к точности фиксации расстояния L и ориентации обтекателя. По приблизительным оценкам, погрешность установки величин L_1 и L_2 не должна превышать величину $\Delta L = 0,016\lambda$, что довольно проблематично обеспечить с организационно-технологической точки зрения для обтекателей с высокими массогабаритными характеристиками.

Для второго способа главной проблемой является выбор материала и обеспечение его однородности и равномерности толщины. В частности, для удовлетворительной компенсации отражений средняя толщина материала l_{Π} должна обеспечиваться с точностью $\Delta l_{\Pi} = 0,008\lambda/\sqrt{\varepsilon}$.

В третьем способе отсутствуют недостатки первого, связанные с точностью фиксации положения обтекателя. Более того, при автоматизированных измерениях допускается некоторая расквачка обтекателя, например, на подвесе, наличие которого (подвеса) значительно повышает оперативность измерений. Однако следует упомянуть о необходимости использования двух точно расположенных друг относительно друга приемных измерительных антенн, причем, желательно, идентичных и идентично ориентированных относительно изучаемой ИА. Точность установки антенн $\Delta L_A = 0,016\lambda$. При измерениях данным способом величина d_2 в выражения (2)–(4) должна входить в удвоенном виде.

Четвертый из перечисленных способов обладает простотой и оперативностью оценки вклада реакции обтекателя в величину $E_{\text{пр}}$. Однако в связи с изменением коэффициента отражения $|R|^2$ данный способ может закладывать погрешности, значительно возрастающие при приближении углов падения ЭМВ к углам компенсации (согласования). Кроме того, взаимная ориентация об-

текателя и излучающей апертуры может отличаться от соответствующих штатных характеристик, что противоречит описанной выше общей методике.

Главной проблемой всех вышеперечисленных способов вариации фазы является их потенциальная узкополосность, вызванная зависимостью результатов измерений от стабильности частоты и геометрического положения обтекателя. Далее будет рассмотрен способ, основанный на многочастотных измерениях, позволяющий нивелировать отражения от обтекателя при измерении методом замещения.

3. Способ, основанный на многочастотных измерениях (многочастотный способ)

Для исключения влияния переотражений на измеряемую величину потерь в обтекателе (в частности, способом замещения) может использоваться вариация несущей частоты сигнала, в отличие от вышеизложенных методов, суть которых фактически сводится к вариацией фазы переотраженного сигнала.

Сущность данного метода заключается в следующем:

- для изменения фазы отраженного сигнала используется вариация несущей частоты;
- измерение производится во множестве частотных точек с последующей обработкой с целью исключения влияния изменения коэффициента модуляции $M(L)$ при расчете величины потерь Π .

Рассмотрим рабочее место для проведения измерений параметров обтекателей способом замещения (см. рис. 2). Пусть λ_1 и λ_2 – границы диапазонов длин волн, в которых будет осуществляться серия измерений величин $E_{\text{пр}i}$, где i – порядковый номер измерения.

Тогда для того, чтобы периодическая функция $M(L)$ при изменении длины волны с λ_1 до λ_2 осуществила n полных периодов, необходимо выполнение равенства

$$\frac{2L}{\lambda_1} - \frac{2L}{\lambda_2} = n, \quad (7)$$

где n – целое положительное число.

Найдем диапазон длин волн (частот) $\lambda_1 \dots \lambda_2$, в котором следует производить измерение, для случая заданной средней длины волны λ_0 , равной

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}. \quad (8)$$

Для этого решим совместно (7) и (8) через систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{2L}{\lambda_1} - \frac{2L}{\lambda_2} = n; \\ \lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}. \end{cases}$$

Решение системы в общем виде дает следующий диапазон длин волн:

$$\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda],$$

где

$$\Delta\lambda = \frac{\sqrt{4L^2 + \lambda_0^2 n} - 2L}{n}. \quad (9)$$

Для случая равномерного распределения частотных точек внутри диапазона $[\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ и величины $n \gg 1$ потери можно найти как среднее арифметическое расчетных потерь в каждой из частотных точек:

$$\Pi = \frac{\sum_{i=1}^N \Pi_i}{N}, \quad (10)$$

где N – количество измерений; $\Pi_i = \frac{E_{\text{пр}i}}{E_{0i}}$ – расчетные потери для каждой i -й частотной точки;

$E_{при}$, E_{0i} – измеренные величины сигналов для внесенного обтекателя и без него соответственно.

Очевидно, что чем больше величина n и больше количество точек N , тем точнее результат, полученный по (10). Величины n и N зависят от средней длины волны λ_0 и расстояния до обтекателя L .

Оценим границу использования способа для узкого диапазона частот, лежащих в пределах $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$. Для этого введем величины, характеризующие диапазон ($\Delta\lambda_{норм}$) и расстояние до обтекателя (k), нормированные к центральной длине волны:

$$\Delta\lambda_{норм} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}; k = \frac{L}{\lambda_0}.$$

Тогда

$$\Delta\lambda_{норм} = \frac{\sqrt{4k^2 + n^2} - 2k}{n}. \quad (11)$$

На рис. 3 показана зависимость $\Delta\lambda_{норм}$ от величины k для нескольких характерных величин n : 1, 2, 5, 10. С ростом величины n возрастает и точность измерений (при соответствующем росте N), так как увеличивается количество частотных точек. Однако с целью уменьшения минимально необходимого расстояния до обтекателя (в частности для выполнения условия (4)), величину следует ограничить: $n = 5 \dots 10$.

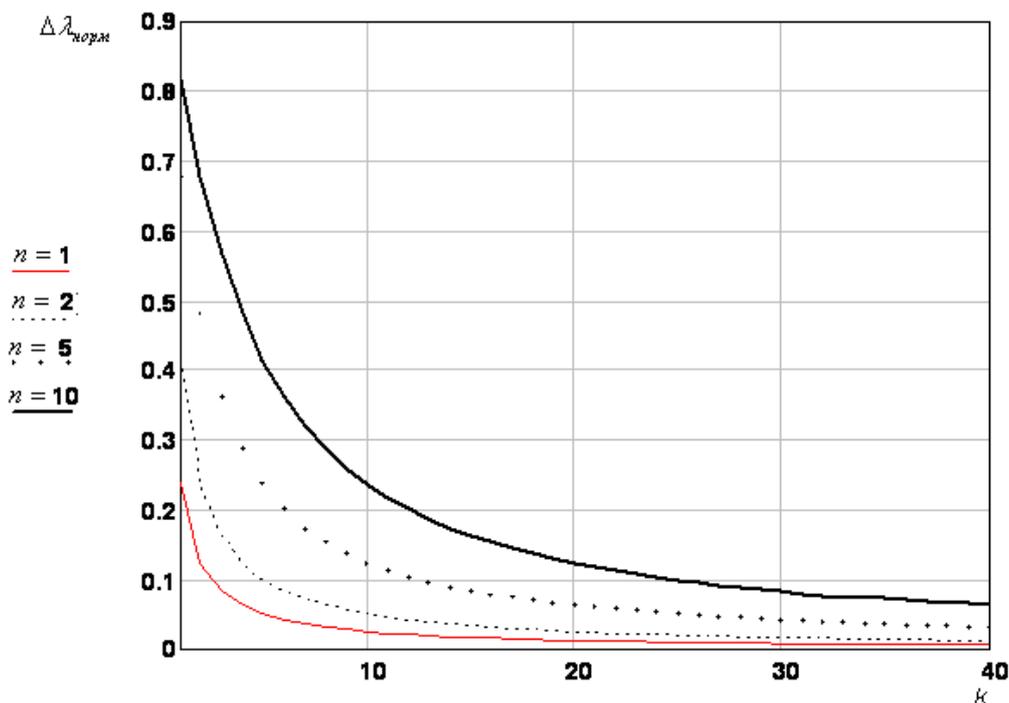


Рис. 3. Зависимость величины $\Delta\lambda_{норм}$ от величины k для различных значений n

Анализ графика рис. 3 показал, что для сохранения минимальной ширины диапазона $\Delta\lambda_{норм} \leq 0,1$ необходимо и достаточно, чтобы расстояние до обтекателя составляло $L \geq (10 \dots 15)\lambda_0$, что соответствует $n = 5 \dots 10$. Данное значение L несколько меньше минимального расстояния, на котором пропадают осцилляции коэффициента усиления и максимума ДН для обтекателя плоской формы (приведенного в [1, с. 68]): $L \geq (25 \dots 30)\lambda_0$, что позволяет производить измерения на меньших расстояниях.

4. Краткое описание методики измерения. Замечания

Существует два основных подхода к согласованию в полосе частот, позволяющих синтезировать соответственно «электродинамически тонкие» и «электродинамически согласованные» обтекатели [6]. В первом случае подразумевается широкополосное, во втором – узкополосное или многодиапазонное согласование. Применение многочастотного метода для «электродинамически согласованных» обтекателей ограничено требованием стабильного уровня согласования. Рабочий диапазон синтезируемой структуры должен быть не уже минимально необходимого, определенного по (11) или рис. 3 для известного расстояния L и выбранной величины n . При выполнении данного требования, методику измерения можно использовать не только для «электродинамически тонких», но и «электродинамически согласованных» обтекателей.

Ниже кратко приводится последовательность вычислений и алгоритм измерений, необходимых для реализации предложенного способа. Заданными величинами будем считать следующие: центральная рабочая частота λ_0 , габаритные размеры измерительных антенн d_1 и d_2 и обтекателя a .

1. Согласно выражениям (2)–(4), (9) и графикам рис. 3 определяются геометрические размеры рабочего места и необходимый диапазон частот измерения $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$. Причем: $k = 10 \dots 30$, $n = 5 \dots 10$, $N > (10 \dots 20)n$.

2. Производятся замеры величин E_{0i} на рабочем месте без обтекателя и величин $E_{при}$ с обтекателем для каждого $i = 1, 2, \dots, N$.

3. Согласно (10) на основании рассчитанных серий величин Π_i для каждой i -й частотной точки находится величина потерь Π .

Рассмотрим особенности использования данного способа для случая измерения потерь в широкой (более минимально необходимого рассчитанного диапазона $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$) полосе частот. Действительно, измеренная и рассчитанная согласно (10) величина потерь Π для заданного диапазона $\lambda_1 \dots \lambda_2$ не позволяет выявить возможные локальные экстремумы потерь в частотном диапазоне, однако это зачастую и не требуется. Для обтекателя, предназначенного для работы в составе РЛС с широкой сплошной полосой рабочих частот, величина Π будет характеризовать качество изготовления, а также комплексные радиотехнические характеристики станции в полосе частот.

5. Проверка методики

Рассмотрим пример применения вышеизложенной методики на экземпляре плоского трехслойного сотового обтекателя, изготовленного по отработанной технологии. Поведение радиотехнических параметров в полосе частот и углах падения ЭМВ данного обтекателя считались известными.

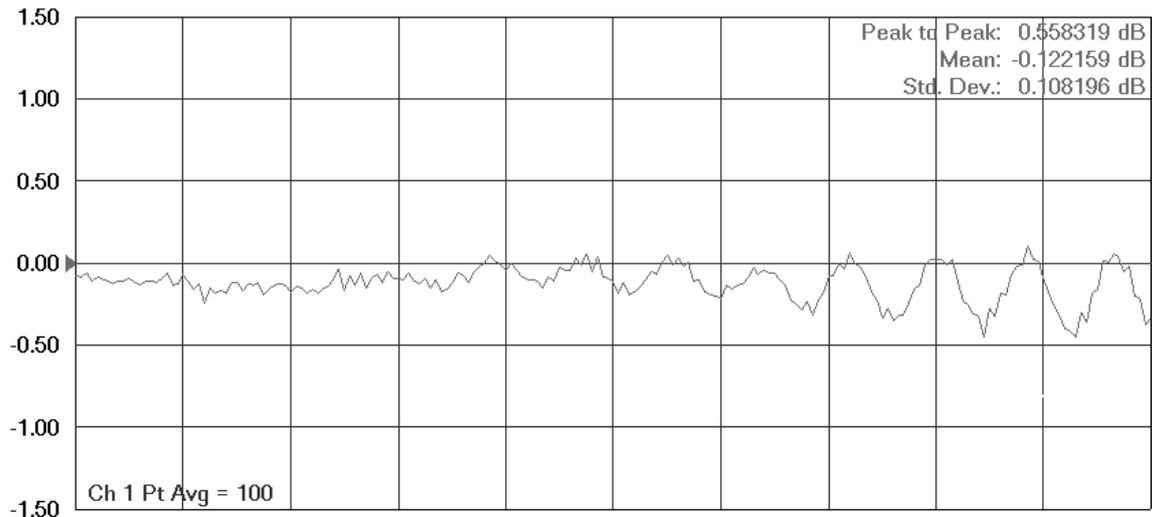
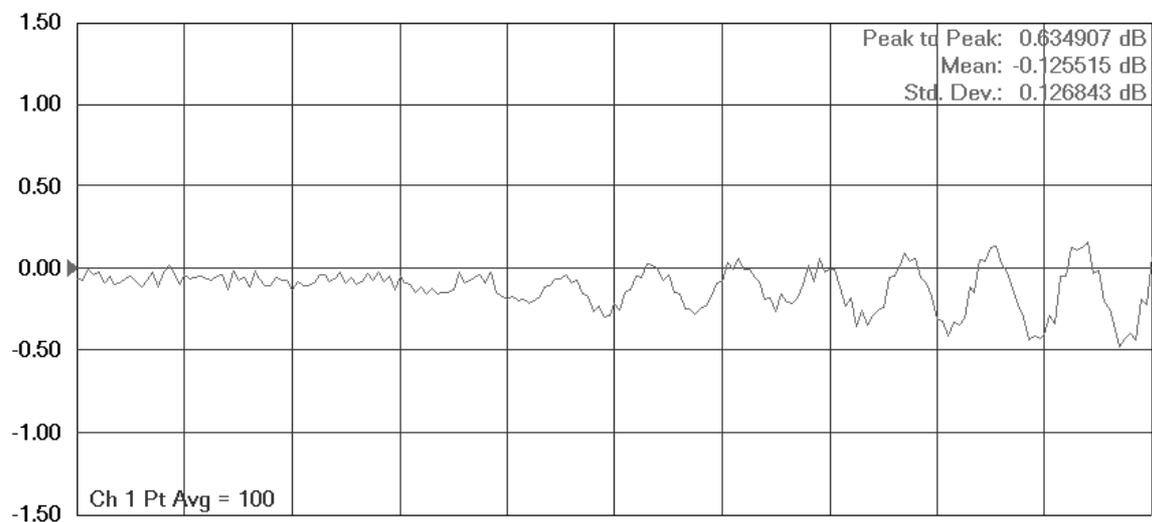
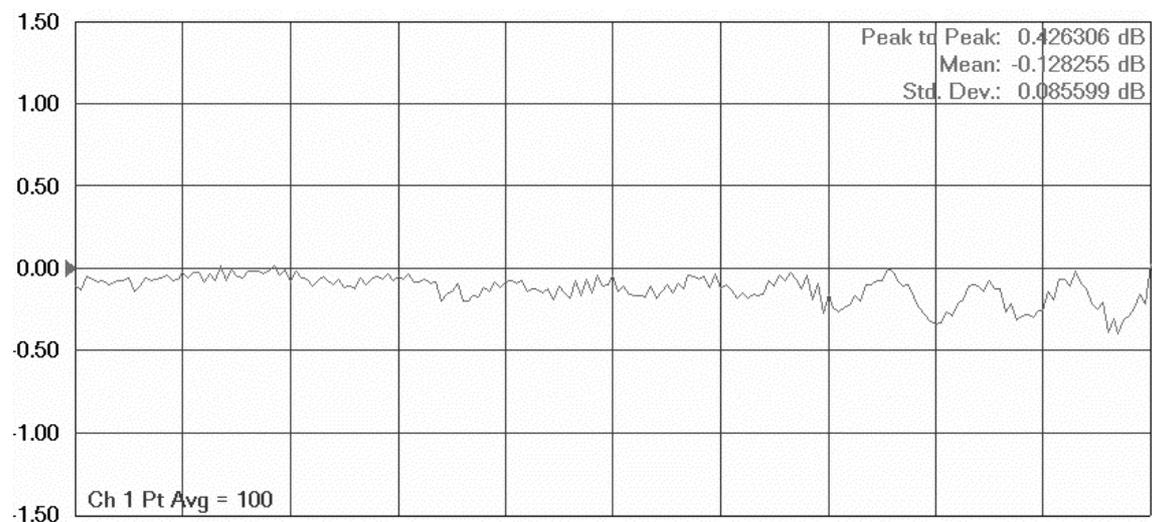
В рабочем месте (см. рис. 2) вместо генератора Г и приемного регистрирующего устройства ПрУ был использован векторный анализатор цепей. Это позволило стабилизировать результаты, поднять точность измерений и автоматизировать некоторые их этапы. В качестве измерительных антенн были выбраны антенны П6-23А. С целью исключения влияния побочных отражений ЭМВ работы проводились в специализированной безэховой камере для антенных измерений, описанной в [7].

На основе вышеизложенной методики получены следующие относительные величины диапазона частот и расстояния для выбранного $n = 5$: $\Delta\lambda_{норм} = 0,06$, $k = 23$.

Измерения Π_i в области длин волн $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ производились автоматически ($N > 200$). Предварительно в данной области была осуществлена калибровка уровня сигнала анализатора методом автоматической нормализации значения без внесенного обтекателя (таким образом зафиксирован уровень E_{0i} во всем диапазоне частот).

Результаты измерений и обработки показаны на рис. 4. Расчет величины Π производился автоматически – штатными средствами векторного анализатора (см. параметр *Mean* на рис. 4) усреднением в диапазоне измеряемых частот. Данная величина с учетом исключения малозначащих знаков составляет $\Pi = 0,12$ дБ, что соответствует среднему уровню условной медианной линии для графика.

Далее были проведены исследования устойчивости методики в диапазоне расстояний $L = (k \pm 1)\lambda_0$. Результаты приведены на рис. 5 и 6.

Рис. 4. График величин Π_i в диапазоне $[\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ при $L = k\lambda_0$ Рис. 5. График величин Π_i в диапазоне $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ при $L = (k+1)\lambda_0$ Рис. 6. График величин Π_i в диапазоне $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ при $L = (k-1)\lambda_0$

6. Анализ результатов

1. Измеренная величина потерь Π для каждого из трех положений обтекателя повторилась с высокой точностью: до 2-го знака после запятой для величины, выраженной в логарифмических единицах. Причем механическая фиксация обтекателя не производилась (обтекатель подвешивался) ни в одном случае, а величина осцилляции отраженной волны (как следует из рис. 4–6, параметр *Peak to Peak*) была соизмерима, и даже превосходила величину потерь. При этом амплитуда визуально наблюдаемых колебаний обтекателя вдоль L составляла величину порядка $(0,3...0,5)\lambda_0$, а мгновенные значения Π (параметр *Mean*), наблюдаемые в реальном времени, совпадали (сохранялись) до 3–4 знака после запятой.

2. На рис. 4 и 5 можно наблюдать, что величина потерь Π_i в некоторых точках приобретает положительные значения, т. е. происходит согласование обтекателя с измерительной антенной. В этом случае КУ САО становится больше, чем КУ обособленной антенны.

3. Для проверки полученных предложенным методом результатов была проведена оценка потерь в обтекателе другим известным способом: перенаправлением переотраженной ЭМВ мимо апертуры измерительной антенны. Измерения проводились с учетом отсутствия экстремумов величины Π в данном диапазоне углов, что позволяет считать выбранный метод вполне допустимым.

Минимально необходимый угол поворота для каждого конкретного случая был найден эмпирическим путем. Анализ результатов, представленных на рис. 7 и сопоставление с рис. 4–6, показали, что при повороте обтекателя на 20° осцилляция сигнала значительно снизилась. Форма кривой также подтверждает отсутствие экстремумов для выбранного значения угла разворота в выбранном частотном диапазоне $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$.

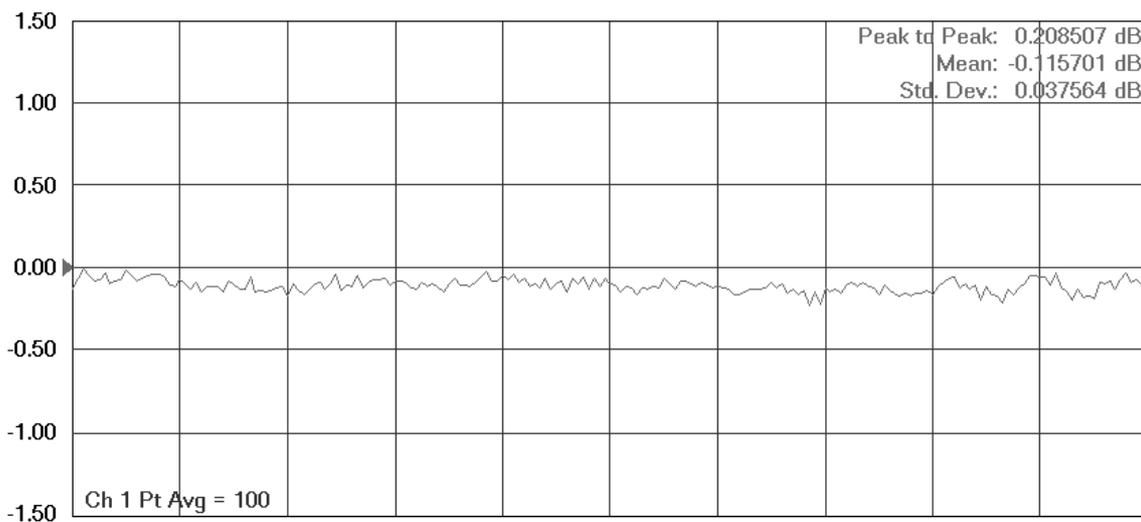


Рис. 7. График величин Π_i (дБ) в диапазоне $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ при $L = k\lambda_0$.
Обтекатель повернут на угол 20° в E -плоскости.

В диапазоне $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$ пиковые (минимальные и максимальные) значения величины Π_i составили: 0 и 0,21 дБ. Измеренная величина потерь в центральной точке $\lambda = \lambda_0$ составила $\Pi = 0,10...0,12$ дБ, причем не удалось обеспечить стабильность результатов в коротком временном интервале. Кроме того, не удалось добиться повторяемости результатов до второго знака после запятой, из-за чего результаты измерения величины Π представлены в виде диапазона. Причинами возникновения данных погрешностей следует считать влияние ряда организационно-технологических факторов, в частности высокая парусность обтекателя (даже в цеховых условиях) при наличии свободного подвеса, не позволявшая фиксировать угол отклонения, а также обеспечить его повторяемость. Формально удалось осуществить достоверную оценку потерь в точке с точностью до первого знака после запятой: $\Pi = 0,1$ дБ, что в целом не противоречит значениям, полученным многочастотным способом.

Также интерес представляет расчетная величина потерь в диапазоне частот (см. рис. 7 – параметр $Mean$), которая составила $\Pi = 0,11$ дБ. Данное значение с приемлемой точностью совпадает с величиной $\Pi = 0,12$ дБ, полученной предложенным многочастотным способом. Снижение величины потерь можно считать ожидаемым, так как при отклонении угла падения от нормали происходит снижение коэффициент отражения $|R|^2$.

4. Успешной проверке предложенного метода способствовала стабильность измеряемых величин Π_i , обеспечиваемая как комплексной аппаратной стабильностью современных приборов, так и автоматическим усреднением измеряемых величин в объеме 100 измерений на каждую частотную точку (см. значение параметра $PtAvg$ на рис. 4–7). Данные факторы, а также условия проведения измерений, позволили анализировать столь малые величины.

Заключение

Изложенная методика, исключая (нивелирующая) влияние переотражений при измерении радиопрозрачных укрытий, позволяет производить измерения потерь в обтекателе регулярного типа с использованием метода замещения. Достоинствами способа следует считать:

- измерения производятся на достаточно малых расстояниях от измерительной антенны в зоне осцилляции;
- исключение требований к жесткой фиксации положения обтекателя относительно измерительных антенн в момент замера;
- широкие возможности по автоматизации процесса, вплоть до «мгновенных» вычислений искомой величины Π , как продемонстрировано выше;
- высокая устойчивость результатов измерений: до первого (второго) знака после запятой для логарифмических единиц оценки.

Главный недостаток метода состоит в том, что величина Π оценивается не в заданной частотной точке $\lambda = \lambda_0$, а комплексно для некоторого диапазона длин волн в «окрестностях» точки λ_0 : $\lambda \in [\lambda_0 - \Delta\lambda; \lambda_0 + \Delta\lambda]$.

Литература

1. Каплун, В.А. Обтекатели антенн СВЧ / В.А. Каплун. – М.: Советское радио, 1974. – 240 с.
2. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И.Г. Гуртовник, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.И. Шалгунов; под ред. В.И. Соколова. – М.: Мир, 2003. – 368 с.
3. Пригода, Б.А. Обтекатели антенн летательных аппаратов / Б.А. Пригода, В.С. Кокунько. – М.: Машиностроение, 1970. – 288 с.
4. Измерение характеристик радиопрозрачного обтекателя бортовой антенны канала спутниковой связи самолета ДРЛО / В.С. Верба, А.В. Виноградный, В.Н. Жданов и др. // Радиотехника. – 2009. – № 8. – С. 120–127.
5. Фрадин, А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. – Изд. 2-е, доп. – М.: Связь, 1972. – 352 с.
6. Особенности проектирования и разработки радиопрозрачных обтекателей и укрытий, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн / С.И. Шалгунов, В.И. Соколов, И.В. Морозова, Ю.С. Прохорова // Антенны. – 2015. – № 3 (214). – С. 63–68.
7. Самбуров, Н.В. Компактный антенный полигон в условиях геометрически ограниченных помещений / Н.В. Самбуров, Д.Ю. Рыбаков, Н.Г. Иванов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, № 10. – С. 25–32.

Самбуров Николай Викторович, начальник отдела, АО «Тайфун», г. Калуга; samburov.n.v@yandex.ru.

Поступила в редакцию 15 июня 2015 г.

MULTI-FREQUENCY TECHNIQUE OF RADOME LOSS MEASUREMENT

N.V. Samburov, Typhoon JSC, Kaluga, Russian Federation, samburov.n.v@yandex.ru

The measurement of the specified radome example radiotechnical parameters for antenna radiation pattern forming the quality evaluation proposes is a technically complicated problem. A radome is often placed at the near-field zone and there is no possibility to evaluate its influence on antenna radiation pattern solitary. The mathematic method or the radome example dielectrically properties evaluation technique are ordinary used at this case. The technique of EM wave transmission loss measurements and the problems of practical implementation are being discussed with regards to radome of a regular type. We offer series of methods to resolve problems, caused by multipath effects. The multi-frequency procedure of radome reflectivity levelling is proposed to measure losses by substitution technique.

Keywords: radome, transmission loss measurement, reflection, measurement, radome measurements.

References

1. Kaplun V.A. *Obtekateli antenn SVCh* [Microwave Antenna Radomes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 240 p.
2. Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. *Radioprozrachnye izdeliya iz stekloplastikov* [Radioparent Fiberglass Plastic Products]. Moscow, Mir Publ., 2003. 368 p.
3. Prigoda B.A., Kokun'ko V.S. *Obtekateli antenn letatel'nykh apparatov* [Aircraft Antenna Radomes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 288 p.
4. Verba V.S., Vinogradnyy A.V., Zhdanov V.N., Smirnov V.S., Tobolev A.K., Chetverik V.N., Shirjaev A.M., Shrayber A.Ja. [Features of the Antenna Module Destined for Mobile Satellite Communication System]. *Radioengineering*, 2009, no. 8, pp. 120–127. (in Russ.)
5. Fradin A.Z., Ryzhkov E.V. *Izmereniya parametrov antenno-fidernykh ustroystv* [The Measurements of Antenna-Feeder Device Parameters]. Moscow, Svjaz' Publ., 1972. 352 p.
6. Shalgunov S.I., Sokolov V.I., Morozova I.V., Prokhorova Yu.S. [Special Aspects of Designing and Development of Radiotransparent Radomes and Protective Covers for Operation in Centimetric and Millimetric Wave Bands]. *Antennas*, 2015, no. 3 (214), pp. 63–68. (In Russ.)
7. Samburov N.V., Rybakov D.Ju., Ivanov N.G. [Compact Antenna Range at Conditions of Geometrically Limited Premisses]. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2014, no. 10, pp. 25–32. (in Russ.)

Received 15 June 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Самбу́ров, Н.В. Многочастотный способ измерения потерь в обтекателях / Н.В. Самбу́ров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 83–94. DOI: 10.14529/ctcr150311

FOR CITATION

Samburov N.V. Multi-Frequency Technique of Radome Loss Measurement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 83–94. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150311