

**Министерство образования Российской Федерации
Научно-исследовательский радиофизический институт
(НИРФИ)**

**Препринт № 490
Предварительная оценка уровня отражений
в новой большой безэховой камере**

**Ю.И. Белов
А.Г. Серкин
С.О. Черникова
Е.Л. Варенцов
А.В. Кашин
М.Х. Мухарьямов**

**Нижний Новгород
2004**

Белов Ю. И.¹, Серкин А. Г.¹, Черникова С. О.¹,
Варенцов Е. Л.², Кашин А. В.², Мухарьямов М.Х.²

(1) Научно-исследовательский радиофизический институт (Н. Новгород) .

(2) Научно-исследовательский институт измерительных систем (Н. Новгород).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ОТРАЖЕНИЯ В НОВОЙ БОЛЬШОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Препринт № 490. – Нижний Новгород: НИРФИ, 2004, 24 с.

УДК 537.8.092.6; 621.37.029.6

Описаны первые эксперименты по исследованию безэховости новой большой безэховой камеры (БЭК) в Нижнем Новгороде (Научно-исследовательский институт измерительных систем) размерами 15 x 10 x 45 м методом коэффициента стоячей волны (КСВ) на частотах 1.5 и 12 ГГц. По результатам экспериментов проведен интерференционный анализ структуры приемного сигнала, который выявил некоторые особенности переотражений в большой безэховой камере, не исследованные ранее, и облегчил понимание процессов рассеяния излучения в БЭК, что важно для дальнейшего улучшения свойств камеры.

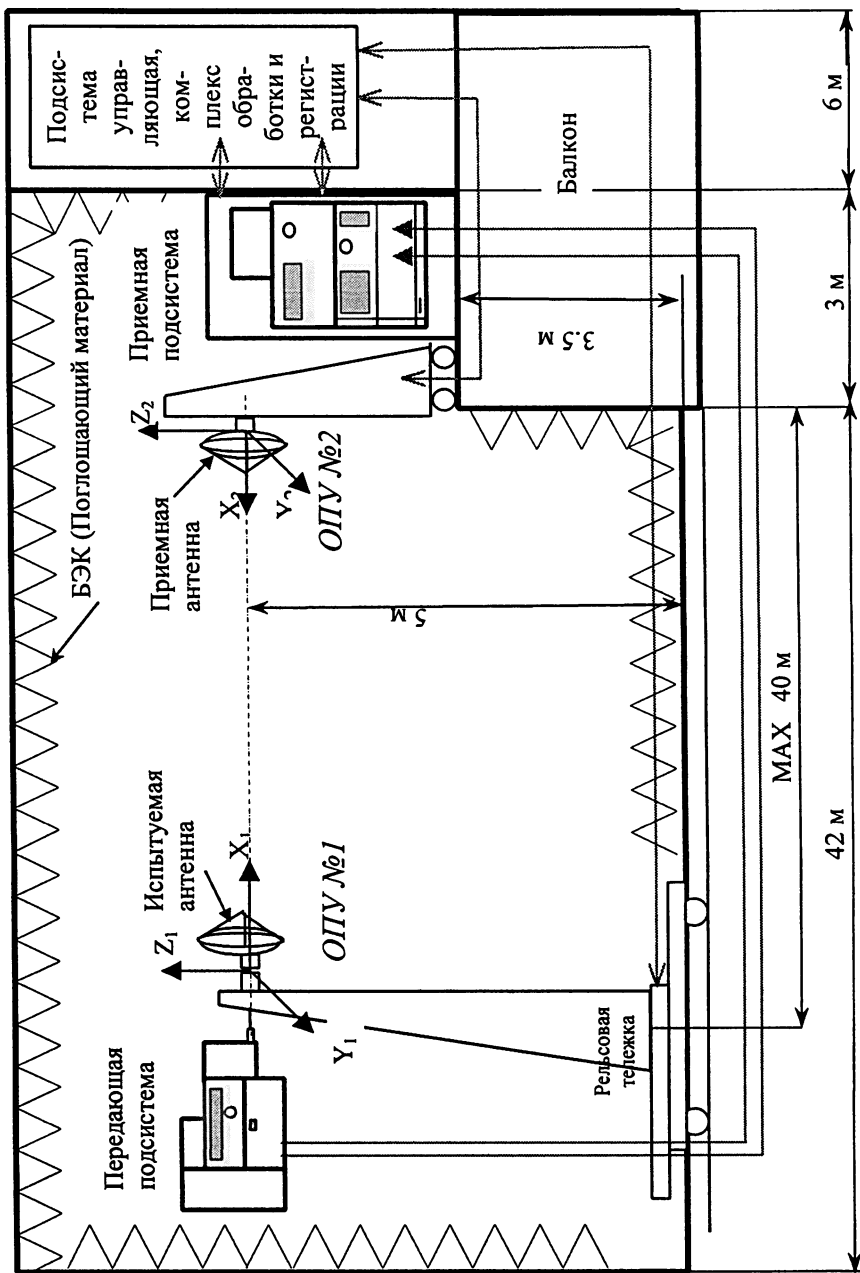
Введение. Особенности проблемы измерений безэховости

Ввод в действие большой (15 м – ширина, 10 м – высота, 45 – длина) безэховой камеры (БЭК) в Нижнем Новгороде (НИИС) – крупное событие в области антенных и радиолокационных измерений. БЭК оснащена комплектом приемной и генерирующей аппаратуры для широкого диапазона частот. Позиционер №1 грузоподъемностью 200 кг для размещения испытуемых антенн имеет поляризационно-азимутальную систему движения, позиционер №2 для измерительной приемной антенны (ИЗА) – поляризационную систему с возможностью независимой подстройки положения поляризационной оси в небольших пределах по координатам азимута и угла места. Структура и размещение оборудования БЭК показана на рис. 1.

Стандартная характеристика описания качества БЭК, как системы границ, позволяющих приблизить условия измерений характеристик излучения к условиям свободного пространства, – коэффициент безэховости – отношение плотности потока мощности рассеянной от стен и окружающих предметов к плотности потока падающей мощности в апертуре приемной антенны. Анализ источников перетражений излученных сигналов в БЭК является сложной, но необходимой задачей при определении малых уровней сигналов при измерениях диаграмм направленности и радиолокационного рассеяния.

Наиболее распространенными и исследованными методами определения коэффициента безэховости являются метод «коэффициента стоячей волны», названный по форме изучаемых при измерениях сигналов [1], а также метод сравнения диаграмм направленности, аналогичный методу КСВ, но с некоторыми особенностями, обсуждавшимися в работе [2].

При измерениях безэховости камер методом КСВ [1] передающая антенна облучает равномерно стены БЭК, а направленная рупорная приемная антенна с малым уровнем задних боковых лепестков перемещается вдоль своей оси симметрии на несколько длин волн. Принятый сигнал изменяется из-за интерференции прямого, излученного антенной, и рассеянного стенами БЭК сигналов, регистрируется и обрабатывается определенным образом для вычисления



параметра безэховости. Ориентация приемной антенны изменяется так, чтобы направить ее на разные области БЭК.

По конструктивным соображениям измерительная аппаратура в описываемой БЭК размещена так, что излучающая подсистема расположена на перемещаемой вдоль специальных цилиндрических направляющих башне, которая может вращаться вокруг азимутальной оси позиционера, а приемная подсистема расположена на неподвижном позиционере. Принцип взаимности позволяет произвести такую перестановку приемной и излучающей антенн для КСВ метода, по крайней мере, для БЭК больших размеров.

Автоматизация измерений безэховости по методу КСВ, когда движение излучающей антенны (ИА) в БЭК вдоль своей оси симметрии и все вращения антенн управляются от ЭВМ, позволяет использовать две идентичные стандартизованные антенны с широкой рабочей полосой, например П6-23А для проведения аттестации БЭК по коэффициенту безэховости во всей полосе антенны. Рабочая полоса П6-23А 1 – 12 ГГц, коэффициент усиления в этом диапазоне от 10 до 27 дБ. Однако такие антенны наряду с широкополосностью обладают и значительной направленностью, что приводит к определенной специфике измерений безэховости: рассеянный от стены БЭК сигнал принимается через достаточно малые боковые лепестки ИзА.

Выбор антенн для измерений

На входе ИзА интерферируют прямой излученный ИА сигнал и рассеянный, главным образом от «засвеченного» участка БЭК (предположим, что все «блестящие» рассеивающие области укрыты радиопоглощающим материалом). Тогда регистрируемая приемная мощность пропорциональна:

$$P_{\text{пр}} \propto P_{\text{иср}} \left| G_{\text{изл}}^{1/2}(A) G_{\text{пр}}^{1/2}(0) e^{i\varphi_1} + G_{\text{изл}}^{1/2}(0) G_{\text{пр}}^{1/2}(\alpha) \hat{S}^{1/2} e^{i\varphi_2} \right|^2 = P_{\text{пр}} [G_{\text{изл}}(A) G_{\text{пр}}(0) + G_{\text{изл}}(0) G_{\text{пр}}(\alpha) \hat{S} + 2 \operatorname{Re}(G_{\text{изл}}^{1/2}(A) G_{\text{пр}}^{1/2}(0) G_{\text{изл}}^{1/2}(0) G_{\text{пр}}^{1/2}(\alpha) \hat{S}^{1/2} e^{i\varphi_{12}})] \quad (1)$$

где функции $G_{\text{изл}}$ и $G_{\text{пр}}$ характеризуют распределение направленности излучающей и приемной антенны, а $\hat{S}(A, \alpha)$ – зависимость коэффициента отражения радиопоглощающего материала (РПМ) от угла падения плоской волны излучения A (полагаем размеры камеры

и длина волны позволяют сделать это допущение) для различных углов рассеяния α .

Углы A , α и геометрические параметры БЭК (a – ширина БЭК, $R_{\text{изл}}$ – расстояние между антеннами) связаны очевидным соотношением, легко устанавливаемым из пояснительного рис. 2:

$$\text{ctg } A = \frac{2R_{\text{изл}}}{a} - \text{ctg } \alpha. \quad (2)$$

Формула учитывает только переотражения от боковых стен БЭК, т.к. задние боковые лепестки обеих антенн полагаем достаточно малыми, а следовательно, рассеянный от фронтальных стен сигнал слабо возмущает главный луч ИА и его угловую окрестность. Кроме того, период интерференционных колебаний приемной мощности для малых углов азимута ИА, как будет оценено ниже, достаточно велик, что затрудняет измерения безэховости методом КСВ (оценка: углы азимута ИА должны быть более 30° при исходном расстоянии между антеннами, порядка 13 м, которое было установлено в описываемых экспериментах).

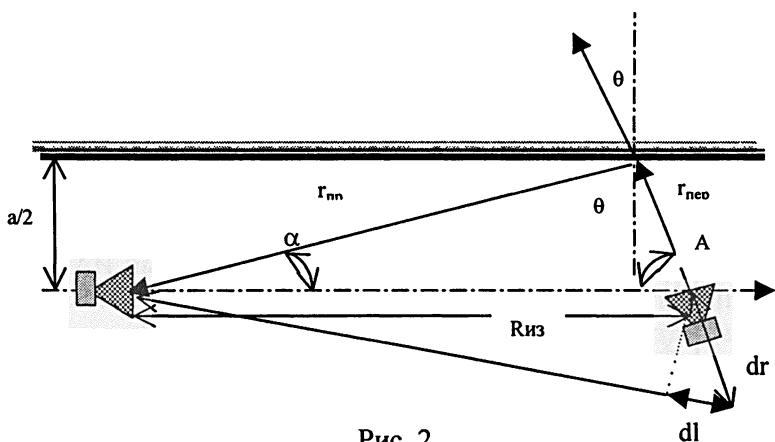


Рис. 2

Для РПМ с малым коэффициентом отражения отношение интерферирующей мощности к средней принимаемой мощности можно представить, пренебрегая вторым слагаемым в (1), как:

$$\frac{P_{\text{инт}}}{P_{\text{ср}}} \sim \frac{\sqrt{\hat{S}G_{\text{нр}}(\alpha)G_{\text{изл}}(0)}}{\sqrt{G_{\text{нр}}(0)G_{\text{изл}}(A)}}. \quad (3)$$

Если же РПМ плохо поглощает электромагнитные волны в некотором диапазоне или для некоторых углов падения или отражения, отношение интерферирующей мощности к средней принимаемой мощности будет выглядеть как:

$$\frac{P_{инт}}{P_{ср}} \sim \frac{\sqrt{G_{нр}(0)G_{изл}(A)}}{\sqrt{\hat{S}G_{нр}(\alpha)G_{изл}(0)}} \quad (4)$$

Диаграммы ИА и ИзА в вертикальной плоскости, полагаем, имеют достаточно узкие угловые размеры и при сканировании ИА рассеянный от пола и потолка сигнал мал и изменяется слабо.

Отношение интерферирующей мощности (3-е слагаемое в квадратных скобках в (1)) к средней принимаемой мощности (сумма 1-го и 2-го), очевидно, определяет погрешность метода аттестации беззеховости.

Предположим, что РПМ имеет малый коэффициент отражения во всем диапазоне углов. К примеру, для вертикальной поляризации падающего излучения материал БЭК имеет коэффициенты отражения по мощности на 1.5 ГГц $S \approx 0.03\%$, а на 12 ГГц $S \approx 0.005\%$. Сравним отношения мощностей для слабонаправленной излучающей антенны (рабочая частота антенны П6-23А = 1.5 ГГц, ширина по уровню 0.5 диаграмм направленности (ДН) ИзА и ИА – 38°) и остронаправленной антенны (рабочая частота П6-23А = 12 ГГц, ширина ДН = 6°). Для расчета соотношений между углами A и α используем выражение (2). Получим значения отношения интерферирующей мощности к средней принимаемой мощности, приведенные в следующей таблице.

Таблица 1

$P_{инт}/P_{ср}$	$A=30^\circ,$ $\alpha=90^\circ$	$A=45$ $\alpha=55^\circ$	$A=60^\circ,$ $\alpha=40^\circ$	$A=90^\circ,$ $\alpha=30^\circ$
$f_{изл}=1.5$ ГГц	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	0.054	0.22
$f_{изл}=12$ ГГц	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	0.04	0.04

Таким образом, нет существенного выигрыша в использовании слабонаправленных специальных антенн для измерений беззеховости методом КСВ и можно использовать широкополосные стандартизованные остронаправленные антенн в качестве облучающих при аттестации БЭК.

Анализ результатов эксперимента

Измеряемая мощность на входе приемной системы – квадрат модуля суммы излученного сигнала и рассеянного. При этом, как показывают эксперименты, проведенные для частот 1.5 и 12 ГГц, см. рис. 3 и 4, приемный сигнал модулирован при передвижении ИА по ЦН и имеет вид стоячей волны с периодом порядка половины длины волны – $\lambda/2$. Модуляция приемного сигнала на частоте 1.5 ГГц заметна слабее, чем на частоте 12 ГГц, т.к. в регистрируемом сигнале присутствует модуляция с периодом порядка длины волны, вызванная очевидно сигналом, отраженным от подвижной тележки позиционера, первоначально не открытой в экспериментах. При углах азимута ИА в пределах $60^\circ - 90^\circ$, где интерференция прямого и отраженного от стен БЭК сигналов имеет пространственный период от 2λ до λ , амплитуда модуляции с периодом $\lambda/2$ труднее оценивается количественно.

В антенной технике подобная модуляция приемного сигнала наблюдается как следствие реакции зеркальной антенны на облучатель, см. [3]. Однако в БЭК при измерениях безэховости присутствуют две антенны: приемная – измерительная и излучающая – испытываемая, поэтому рассмотрим причины модуляции в несколько другом аспекте.

Оценим возможность образования регистрируемой ИзА стоячей волны сигналом, отраженным от радиопоглощающего материала (РПМ) на вход излучающей антенны.

Пусть ИА идеально согласована по входу и облучает боковую стену БЭК (азимут 90°), тогда рассеянную от РПМ и собранную затем на эффективной апертуре ИА мощность $P_{пр}$, можно оценить аналогично приведенному в [3] расчету реакции зеркала на облучатель, исходя из принципов геометрической оптики и значения коэффициента отражения РПМ, взятого из технических условий на поглощающий материал:

$$P_{пр} = P_{неп} \frac{G|F|^2}{4\pi(2r_{неп})^2} \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (5)$$

где $r_{неп}$ – расстояние от апертуры ИА до стены; G – усиление антенны; $A^{(eff)}$ – эффективная площадь антенны;

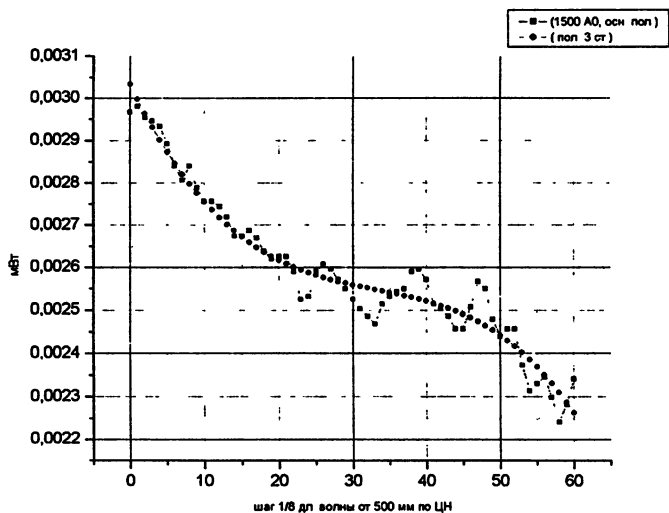


Рис. 3 а

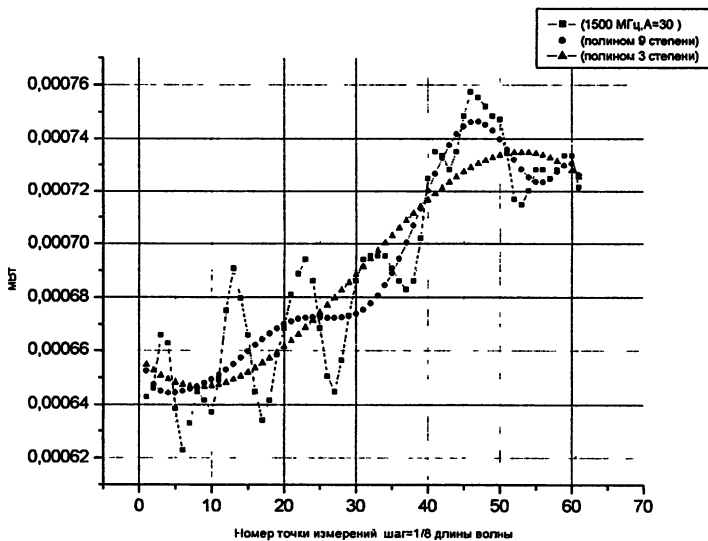


Рис. 3 б

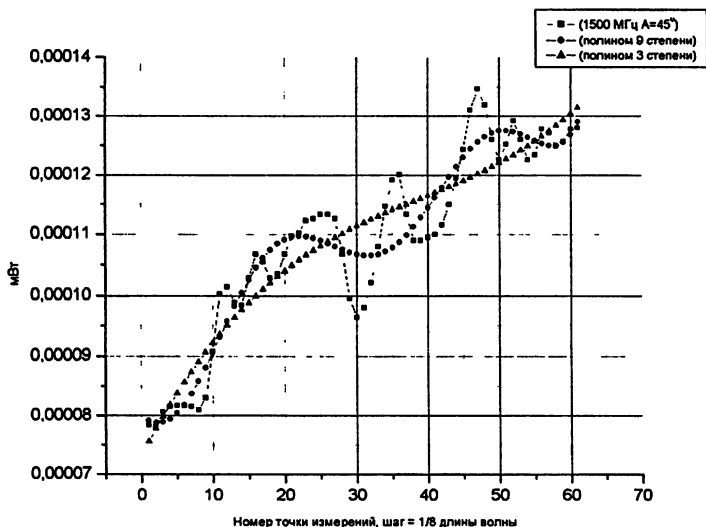


Рис. 3 в

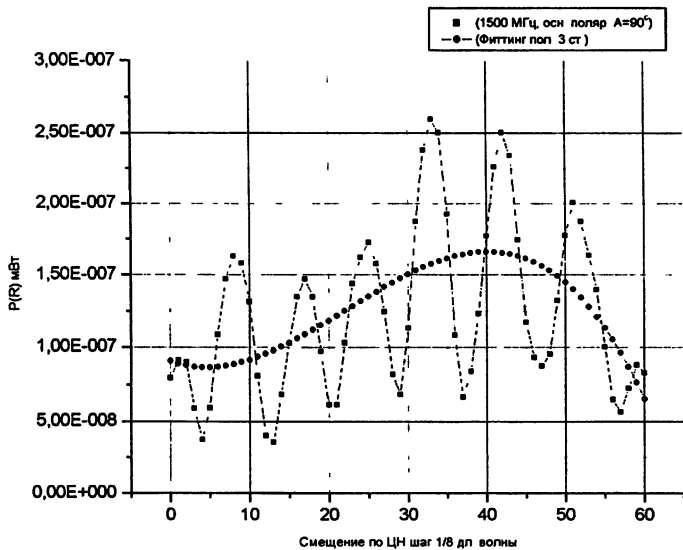


Рис. 3 г

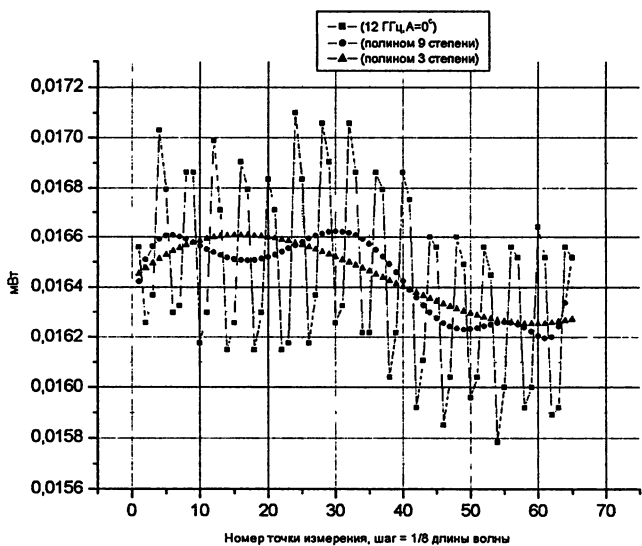


Рис. 4 а

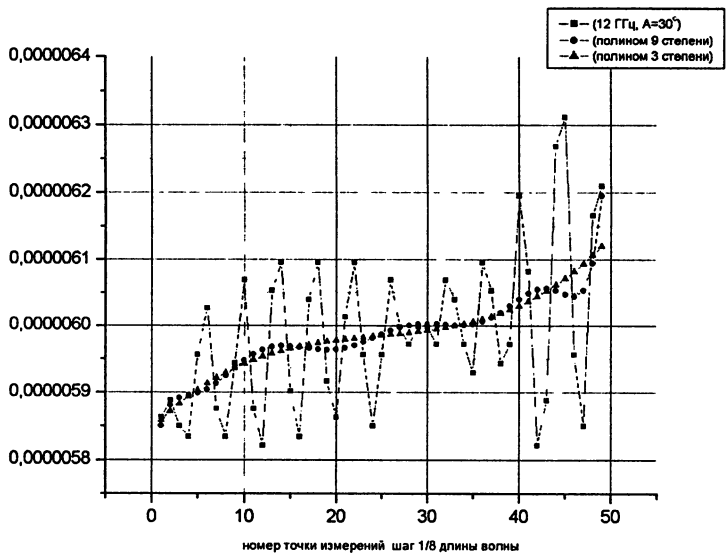


Рис. 4 б

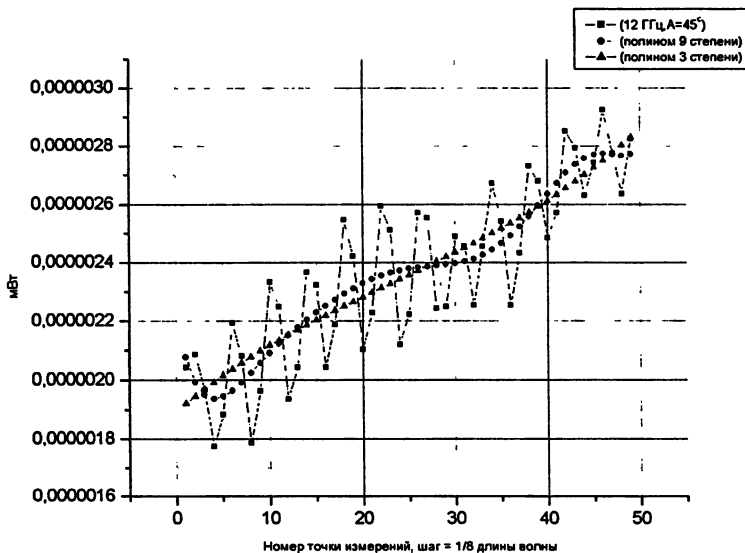


Рис. 4 в

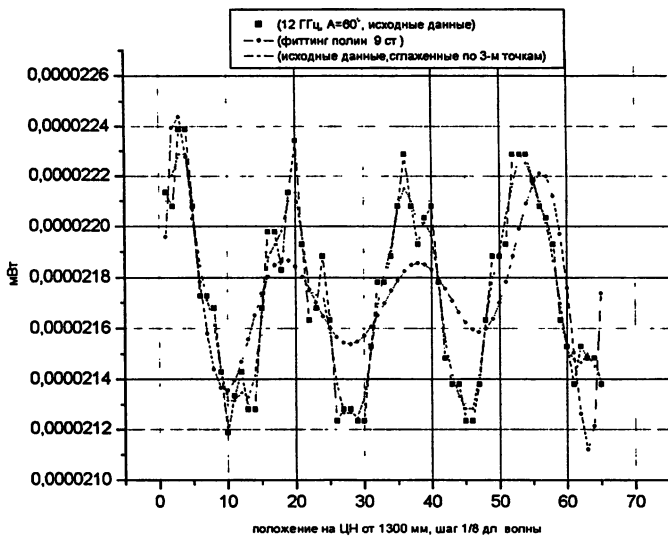


Рис. 4 г

$G = \frac{4\pi A^{(\text{эф})}}{\lambda^2}$; $|F|^2$ – коэффициент отражения РПМ, равный $\approx 5 \cdot 10^{-5}$

для частоты 12 ГГц.

Для антенны П6-23А ($\lambda = 2.5$ см, $G = 500$) и для расстояния от ИА до боковой стены БЭК $r_{\text{пер}} = 7.5$ м отношение отраженной мощности, собранной на эффективной поверхности ИА, к мощности в тракте передатчика примерно равно $2,2 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, условия согласования ИА будут нарушены, что приведет к незначительному отличию КСВ в ее тракте от единицы:

$$\text{КСВ}_T = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|},$$

где оценкой для модуля коэффициента отражения служит величина

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пер}}}}. \quad (6)$$

В соответствии с вышеприведенной оценкой рассеянной мощности $\text{КСВ}_T \approx 1.001$.

Идеально согласованная приемная антенна должна реагировать на эту стоячую волну при движении ИА по ЦН.

Если ИА идеально согласована по входу и облучает фронтальную стену БЭК (азимут 0°), то рассеянную вперед от апертуры ИзА (идентичной по усилению ИА), отраженную затем от фронтальной стены БЭК и собранную на эффективной апертуре ИА мощность $P_{\text{пр}}$, можно приближенно рассчитать, исходя из радиолокационной формулы [4]:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} \frac{G}{4\pi R^2} \frac{4\pi A^{(\text{эф})2}}{\lambda^2 4\pi R^2} \frac{|F|^2 G \lambda^2}{4\pi} = \left[\frac{|F| G^2 \lambda^2}{(4\pi R)^2} \right]^2, \quad (7)$$

где в качестве ЭПР приемной антенны принята величина $\frac{4\pi A^{(\text{эф})2}}{\lambda^2}$ [5].

Коэффициент отражения по вышеприведенной методике для $R \approx R_{\text{изл}} = 12.8$ м (пренебрегаем расстоянием от апертуры ИзА до стены БЭК, см. рис. 4 б) составляет величину порядка $4.3 \cdot 10^{-5}$, что должно приводить к еще меньшему отличию КСВ в тракте от единицы, чем при азимуте ИА 90° , см. оценки выше.

Оценки, выполненные по результатам экспериментов в БЭК с антеннами П6-23А на частоте 12 ГГц (см. записи измеренного сиг-

нала на рис. 4), показывают, что максимальное отношение мощностей в соседних максимум – минимум приемного сигнала ИЗА при изменениях положения ИА (азимут равен 0°) вдоль оси ИА составляет величину порядка 1.06. То есть отношение рассеянной мощности к падающей на ИА составляет величину $2.2 \cdot 10^{-4}$, что существенно больше, чем рассчитанная по формуле (5) величина. Для азимута 90° экспериментальный «КСВ» меньше, хотя точность его вычисления хуже в силу отсутствия отчетливой модуляции с периодом в полдлины волны (см. результаты измерений и раздел «Методика...» настоящего препринта).

Таким образом, рассеянная РПМ назад мощность мало должна сказываться в результатах эксперимента.

В промежуточных значениях азимута ИА, когда рассеянная назад мощность может иметь большее значение [4], необходимо знание индикатрисы рассеяния РПМ. Имеются аналитические оценки [4] полей, рассеянных «черным» диском, которые можно использовать для анализа их асимптотического поведения при выделении областей отражения в виде нескольких зон Френеля, но не для количественных измерений коэффициента безэховости.

Оценим теперь возможность появления периодичности с половиной длины волны в приемном сигнале за счет отличия от единицы КСВ приемной антенны (ИЗА). В такой постановке проблема возникновения стоячей волны за счет перемещения источника падающей от ИА волны идентична задаче влияния КСВ облучателя зеркальной антенны [3].

Суммарная мощность, регистрируемая на выходе приемника, являясь результатом интерференции сигнала, прямого, излученного ИА в направлении на ИЗА и рассеянного от стен БЭК, главным образом от стены, «засвеченной» главным лепестком ИА запишется как

$$P_{\text{пр}} = \left| \left\{ G_{\text{изл}}^{1/2}(A) e^{-ikr_{\text{изл}}} + G_{\text{изл}}^{1/2}(0) G_{\text{пр}}^{1/2}(-\alpha) \hat{S}^{1/2}(A, -\alpha) e^{-ik(r_{\text{пр}} + r_{\text{пр}})} \right\} + \Gamma \{ \dots \} \right|^2 \quad (8)$$

где $-r_{\text{изл}}$, $r_{\text{пр}}$, $r_{\text{пр}}$ являются функциями расстояния между ИА и ИЗА, размеров БЭК, азимута поворота ИА и линейного перемещения ИА dr по ЦН и легко устанавливаются из геометрических соображений, см. рис. 2; третье слагаемое Γ – коэффициент отражения от нагрузки приемной антенны, умноженный на предыдущие два слагаемых, т.е. те что заключены в фигурные скобки.

Обозначив комплексные сомножители при экспонентах для краткости записи как U_1 и U_2 , получим следующее выражение для принимаемой мощности:

$$P_{\text{пр}} = |U_1 + U_2|^2 [1 + |\Gamma|^2 + 2 \operatorname{Re} \Gamma^*]. \quad (9)$$

Фаза коэффициента отражения, которая отвечает за период модуляции сигнала в задаче о реакции зеркала на облучатель, для нашей проблемы выглядит иначе:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{|U_1| \sin[2k(d + dr \cos A)] + |U_2| \sin[2k(r_{\text{изл}} + r_{\text{пр}} + dr)]}{|U_1| \cos[2k(d + dr \cos A)] + |U_2| \cos[2k(r_{\text{изл}} + r_{\text{пр}} + dr)]}, \quad (10)$$

Вид функции фазы от величины перемещения ИА по ЦН сильно зависит от отношения модулей напряжений U_1 и U_2 , которые, как видно из (8), определяются характеристиками направленности ИА и ИЗА, а также матрицей рассеяния РПМ БЭК. Для одинаковых направленных антенн, используемых при измерениях безэховости, в целях анализа процессов рассеяния полей достаточно рассмотреть отношение в пределах от 0.05 до 15. На рис. 5, 6 приведены зависимости фазы стоячей волны от перемещения ИА в длинах волн для двух различных соотношений амплитуд U_1 и U_2 . При малых углах азимута ($\sim 30^\circ$), когда в приемном сигнале превалирует прямой излученный сигнал (рис. 6) пространственный период колебаний близок к половине длины волны также, как и при другом, противоположном, условии (рис. 5), когда сигнал, рассеянный от «засвеченного» пятна БЭК больше прямого, излученного боковым лепестком ИА, реализуемого при $A > 45^\circ$. При близких уровнях сигналов возможны сбой периода пространственных колебаний (см. рис. 5а), что, вероятно, происходило и в эксперименте, запись которого представлена на рис. 4б.

Методика расчета коэффициента безэховости

Модуль суммы комплексных сигналов U_1 и U_2 зависит от разности фаз прямого излученного и рассеянного от «засвеченной» поверхности сигналов.

Разность хода излученного и рассеянного в направлении ИЗА сигналов выражается формулой

$$dl = 2dr \sin^2(A/2). \quad (11)$$

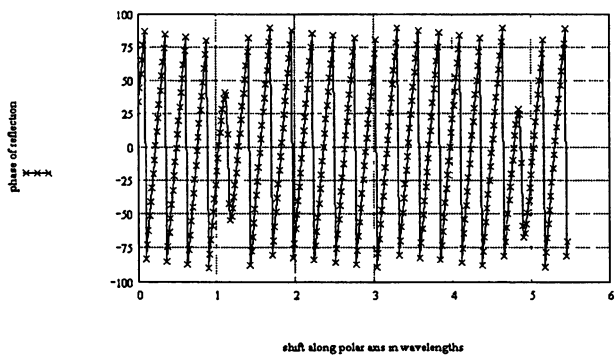


Рис. 5 а. $U_2/U_1 = 0.98$, $A = 30^\circ$

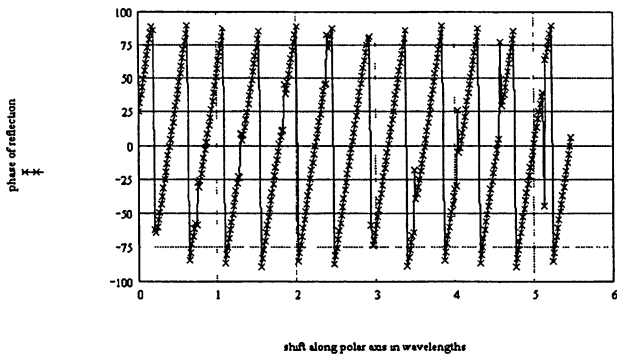


Рис. 5 б. $U_2/U_1 = 0.98$, $A = 85^\circ$

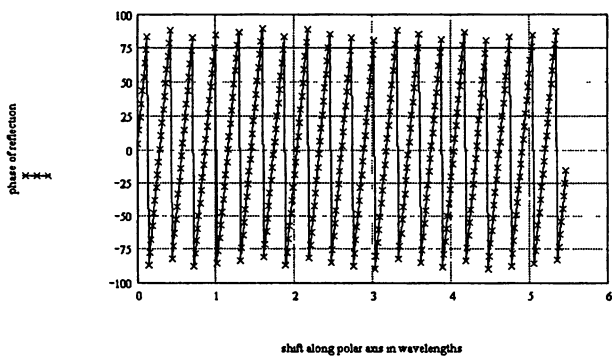


Рис. 6 а. $U_2/U_1 = 0.098$, $A = 30^\circ$

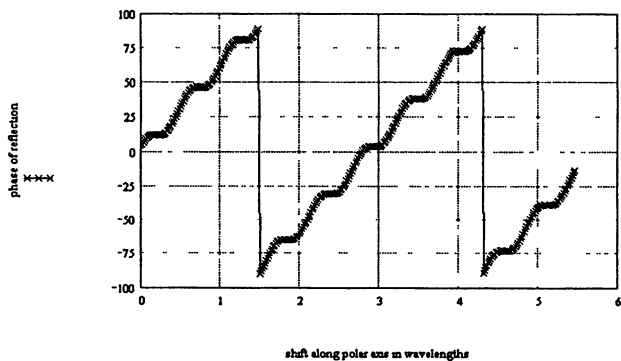


Рис. 6 б. $U_2/U_1 = 0.098$, $A = 85^\circ$

Периоды колебаний принимаемой мощности при движении ИА вдоль своей оси симметрии, вычисленные по формуле (11), см. табл. 3), четко определяются в записях экспериментов для углов 60° и 90° .

Запишем принимаемую мощность в виде

$$P_{пр} = [1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi] [P_{0изл}(A) + P_{орас}(A, \alpha) + 2\sqrt{P_{0изл}(A)P_{орас}(A, \alpha)} \cos kll], \quad (12)$$

где $P_{0изл}$ и $P_{орас}$ – не возмущенные стоячей волной излученная и рассеянная мощности.

Отношение максимальной принятой мощности к минимальной $\eta' = P_{\max} / P_{\min}$ в исходном уравнении, обычно используемом¹ для вычисления КБЭ [1, 2], зависит от фазы стоячей волны и разности фаз излученной (прямой) и рассеянной волн:

$$\eta' = \frac{[1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi_1] [P_{0изл}(A) + P_{орас}(A, \alpha) + 2\sqrt{P_{0изл}(A)P_{орас}(A, \alpha)}]}{[1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi_2] [P_{0изл}(A) + P_{орас}(A, \alpha) - 2\sqrt{P_{0изл}(A)P_{орас}(A, \alpha)}}]. \quad (13)$$

Таким образом:

$$\eta' = \left[\frac{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi_1}{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi_2} \right] \frac{1 + \rho + 2\sqrt{\rho}}{1 + \rho - 2\sqrt{\rho}} = \left[\frac{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi_1}{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \varphi_2} \right] \eta. \quad (14)$$

Максимальное отличие η' и η определяется первым сомножителем в (14):

$$\eta' = \frac{(1 + \Gamma)^2}{(1 - \Gamma)^2} \eta. \quad (15)$$

Решение уравнения (14) для «некорректированного» на стоячую волну коэффициента безэховости (КБЭ) получим в виде

$$\rho' = \left[\frac{\sqrt{\eta'} - 1}{\sqrt{\eta'} + 1} \right]^2 = \left[\frac{\sqrt{\eta} (1 + |\Gamma|) - (1 - |\Gamma|)}{\sqrt{\eta} (1 + |\Gamma|) + (1 - |\Gamma|)} \right]^2, \quad (16)$$

а поделив на $(1 + \sqrt{\eta})$, приведем (16) к виду

¹ На основании решения этого уравнения построены номограммы в [1], как удобная форма обработки экспериментальных данных.

$$\rho' = \frac{(\sqrt{\rho} + |\Gamma|)^2}{(1 + |\Gamma|\sqrt{\rho})^2} \quad (17)$$

С предельной относительной погрешностью $\Delta = |\Gamma|\sqrt{\rho} / (\sqrt{\rho} + |\Gamma|)$ получаем приближенное равенство

$$\sqrt{\rho'} \approx \sqrt{\rho} + |\Gamma|. \quad (18)$$

Оценка относительной погрешности для эксперимента по аттестации КБЭ на 12 ГГц, где в качестве неизвестной величины $\sqrt{\rho}$ взято ее некорректированное значение $\sqrt{\rho'}$ ($\rho = -25$ дБ, $\text{КСВ}_T = 1.5$) составляет величину порядка $4.4 \cdot 10^{-2}$. КСВ, вычисленный по результатам экспериментальной оценки КБЭ на частоте 12 ГГц, представлен в табл. 2 как функция от азимута.

Таблица 2.

Азимут ИА	0°	30°	45°	60°
КСВ _{расч}	1.024±0.003	1.022±0.003	1.096±0.03	1.014(макс)

КСВ_{расч} в табл. 2 вычислялся, как среднее от значений корня квадратного из отношений измеренной мощности в максимуме к мощности в минимуме, определенных на всем интервале перемещения ИА вдоль ЦН (7 длин волн). Период чередования максимумов – половина длины волны.

Таким образом, полученные значения КСВ_{расч} – характеристики колебаний мощности в приемном тракте, ближе к измеренным значениям КСВ входа приемной системы (паспортное значение в диапазоне до 17.44 ГГц менее 1.3).

Данный результат позволяет сделать вывод о том, что более вероятной причиной наблюдаемых изменений мощности при движении ИА вдоль поляризационной оси позиционера №1 может быть отличие КСВ входа приемного тракта от единицы. Следовательно, к приемной системе оборудования БЭК необходимо предъявлять более жесткие требования по ее согласованию с ИзА.

Значительное отличие КСВ_{расч} для угла азимута 45° от других можно, по-видимому, объяснить совместным влиянием волн разной природы в тракте излучающей и приемной антенны: одной – отраженной от нагрузки ИзА и другой – отраженной от РПМ на вход ИА. Когда U_1 в (9) мал, т.е. когда ИА излучает боковым лепестком на

примную антенну, регистрируемый КСВ определяется произведением амплитуд и разностей фаз коэффициентов отражения от нагрузки ИЗА и коэффициента отражения от РПМ назад для наклонных углов падения излучения ИА.

Этот экспериментальный факт заставляет предложить метод обработки измеренных данных, не связанный с предположением о малости отраженного назад от РПМ излучения и учитывающий влияние отраженного приемного сигнала в соответствии с формулой (18).

Обработка измеренных сигналов

Обработка измеренных сигналов осуществлялась с помощью пакета Origin 6.1, который позволяет проводить аппроксимацию сигнала полиномами от 1 до 9 степени, рассчитать оценку среднеквадратического отклонения (СКО) от аппроксимационного полинома и определить максимальные и минимальные отклонения записи от него.

При обработке результатов необходимо учитывать изменение среднего уровня принимаемого сигнала, связанное с перемещением ИА. Перемещение ИА вызывает изменения мощности, связанные с падением плотности потока от расстояния до приемной антенны и с изменениями углов относительной ориентации антенн. Учет этих явлений достаточно проводить с помощью аппроксимации данных полиномом 2-3 степени. Нами использовался полином 3 степени, отличия результатов при использовании полинома 2 степени – незначительны.

Осцилляции принятой мощности с периодом полдлины волны при перемещении ИА по направляющим учитывались с помощью определения в пакете Origin СКО отклонений σ от аппроксимирующего полинома, исходя из выражения (13) и результатов его теоретических вычислений:

$$\sigma^2 / P_{\text{cp}}^2 = \int_{L_{\text{min}}}^{L_{\text{max}}} [P_{\text{np}}^2 - \langle P_{\text{np}} \rangle^2] dl \approx \Gamma^2 (1 + \sigma_{\text{ca}}^2) / P_{\text{cp}}^2, \quad (19)$$

где $\langle P_{\text{np}} \rangle$ – функция перемещения по направляющим, вычисляемая в виде аппроксимационного полинома или другим способом; L_{min} , L_{max} – положения ИА на направляющих, соответствующие максимальному и минимальному рассеянному сигналам; определяются при анализе записи приемного сигнала;

$P_{\varphi} = \frac{1}{2}[P_{np}(L_{\max}) + P_{np}(L_{\min})]$; величина $\sigma_{\text{сл}}$ определяет случайные погрешности измерений отклонений от модулированного среднего значения приемной мощности, включает погрешности дискретизации записи приемной мощности и аппаратную погрешность ее измерения.

Очевидно, в силу того, что обработка данных включает вычисление отношений измеренной мощности, наибольший вклад в составляющую $\sigma_{\text{сл}}$ вносит погрешность дискретизации. Принята модель равномерного распределения отклонения координат максимумов и минимумов «стоячей волны» с периодом полдлины волны, тогда оценка дисперсии равна

$$\sigma_{\text{сл}}^2 \approx \frac{1}{3} \xi^2, \quad (20)$$

где $\xi = 1 - \sin \frac{2\pi}{N}$, N – число шагов перемещения ИА по направлению на длину волны. При $N=10$ $-\sigma_{\text{сл}} \Gamma / P_{\varphi} \approx 11\%$. Эта оценка является обоснованием коррекции измеренного значения коэффициента безэховости согласно выражению (18),

$$\Gamma \approx \frac{\sigma}{P_{\varphi} \sqrt{2}} \approx 0.707 \sigma / P_{\varphi}.$$

Отсюда же следует, что большие значения Γ ограничивают минимальные величины измеряемого КБЭ условием $\rho > \Gamma^2 \cdot 0.11^2$. В противном случае коррекция может привести к отрицательным значениям ρ , что не имеет смысла. В частности, для КСВ 1.3 безэховость с ее коррекцией по выражению (18) можно вычислять для значений КБЭ, больших чем – 32 дБ. Подчеркнем, что под КСВ понимается КСВ_{расч}, см. таблицу 2, где граница измерений КБЭ равна – 45 дБ.

Период осцилляций принятого сигнала при движении ИА по центральному направляющим изменяется согласно формуле (11); часть значений для использованных в экспериментах углов азимута ИА приведена в табл. 3. Экспериментальные записи на рис. 3,4 иллюстрируют корректность этих расчетов.

Особые трудности вызывает определение оценки СКО для вычисления Γ и P_{φ} для углов азимута 60 и 90, где период осцилляций принятого сигнала при движении ИА по ЦН изменяется от 2 до 1

длины волны. Для получения функции P_{cp} и СКО отклонений от среднего мы сглаживали данные фильтром – П-образной функцией с шириной, равной половине длины волны, см. рис. 4 г. При этом в (19) появляются дополнительные осциллирующие члены:

$$\sigma^2 / P_{cp}^2 \approx 2\Gamma^2 - \frac{16\Gamma^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{2\pi}{L_{\text{ит}}} dr + \sigma_{сг}^2 / P_{cp}^2. \quad (21)$$

В качестве вычисляемой в этом случае величины $|\Gamma|$ целесообразно взять ее минимальную оценку в виде $\sigma_{\text{max}}^2 / P_{cp}^2 = 2\Gamma_{\text{min}}^2 + \sigma_{сг}^2 / P_{cp}^2$. При этом оценка коэффициента безэховости будет занижена, т.е. хуже, чем на самом деле.

Таблица 3.

Азимут, град.	Период интерференции в длинах волн	
	0°	0.5
30°	0.5	7.46
45°	0.5	3.42
60°	0.5	2
90°	0.5	1

Предварительные результаты оценки безэховости БЭК НИИИС

Результаты предварительной обработки (вычисления) коэффициента безэховости приведены в табл. 4. В таблице КБЭ приведен к одинаковому уровню прямой, падающей на ИзА, мощности добавлением к вычисленному с помощью выражений (16) и (18) коэффициенту безэховости уровня ДН излучающей антенны в направлении ее на ИзА, выраженного в децибеллах. Коррекция данных на частоте 1500 МГц по формуле (18) не проводилась.

Таблица 4.

Азимут ИА (град)	КБЭ _{макс}	30°	45°	60°	90°
КБЭ (дБ), f = 1.5 ГГц	-15.5	-25	-15.5	-28.5	-30
КБЭ (дБ), f = 12 ГГц	-35	-35	-48.5	-50	-54

Верификация аттестации БЭК по безэховости была проведена методом вычисления средней диаграммы [2] путем измерений азимутальных сечений ИА на частоте 12 ГГц при трех положениях ИА на ЦН в диапазоне 60 мм. Результаты приведены на рис. 7. Вычисленный коэффициент безэховости по номограммам [5] составляет величину – 30 дБ, т.е. находится в удовлетворительном согласии с экспериментом. При этом имеется в виду, что подобные расхождения – норма в сравнении описываемых методов оценки безэховости в [2].

Таким образом, проведенный анализ экспериментальных данных позволил выявить некоторые причины возникновения переотражений в БЭК и оценить их относительные уровни. Для уменьшения рассеянных сигналов и улучшения качества исследованной БЭК рекомендуется более тщательное укрытие РПМ позиционеров и введение специального рассеяния с помощью реконфигурации поверхности БЭК в окрестностях зон Френеля квазизеркального отражения.

В заключение авторы выражают свою благодарность Н.А. Дугину и Г.Н. Чеснокову за плодотворное обсуждение результатов экспериментов.

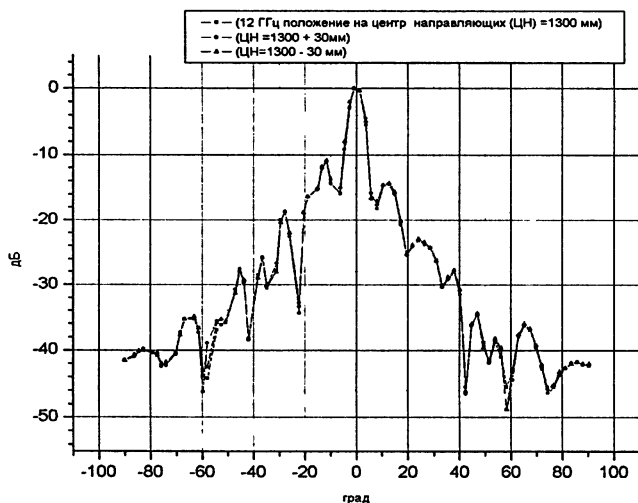


Рис. 7

Литература.

1. Galagan, S. Understanding Microwave Absorbing materials and Anechoic Chambers, parts 1- 4 , *Microwaves*, vol.8, pp. 38 – 41, Dec. 1969; vol.9, pp. 44 – 49, Jan. 1970; №4, pp. 47 – 50, Apr. 1970; pp. 69-73, May 1970.
2. Appel-Hansen, J. *IEEE Trans.*, vol. AP-21, №4, pp. 490 – 498, Apr. 1973.
3. Silver, S. ed. *Microwave Antenna Theory and Design*, M.I.T. Radiation Lab. Series, McGraw-Hill Book Co. New York, 1949.
4. Захарьев Л.Н., Леманский А.А.. Рассеяние волн «черными» телами. - М.: Сов. Радио, 1972. - 288 с.
5. Collin, R.E. Remarks on “Comments on Limitations of the Thevenin and Norton Equivalent Circuits for a Receiving Antenna, *IEEE AP Magazine*, vol. 45, No 4, pp. 99-100, 2003.
6. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. - М.: Радио и связь, 1982. - 128 с.

Belov Yu.¹, Serkin A.¹, Chernikova S.¹(¹Radiophysical Res. Inst., Nizhny Novgorod),

Varentzov E.², Kashin A.², Mukharyamov M.²(²Measuring Systems Res. Inst., Nizhny Novgorod)

PRELIMINARY STUDY OF REFLECTIVITY LEVEL IN NEW LARGE RADIO ANECHOIC CHAMBER

Preprint №490 - Nizhny Novgorod: RRI, 2004, 24 p.

First experiments to investigate the reflectivity level of new large radio anechoic chamber (width – 15 m, height – 10 m, range – 45 m) built at Nizhny Novgorod have been performed by means of the VSWR technique at the 1.5 and 12 GHz frequencies. Data records of experiments have been studied on a subject of its structure. The interferometric analysis revealed some peculiarities of reflections in large anechoic chamber, which were not investigated earlier and in the same time it made easier understanding of scattering processes in the chamber. This is an important study for further improving of the chamber reflectivity.

Белов Юрий Иванович
Серкин Александр Григорьевич
Черникова Светлана Олеговна
Варенцов Евгений Леонтьевич
Кашин Александр Васильевич
Мухарьямов Марат Хасянович

Предварительная оценка уровня отражений в новой большой
безэховой камере

Подписано в печать 14.04.04 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Объем 1,48 усл. П.л.
Тираж 50. Заказ 5540.

Отпечатано в НИРФИ
Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25