

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЙВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ БЕЗЭХОВОСТИ

© 2010 В. С. Бачурин, Д. М. Батухтин, В. Д. Пышный

ОАО «ОКБ «НОВАТОР», г. Екатеринбург

Рассмотрен метод, обеспечивающий измерение эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) объектов в условиях производственных помещений, не имеющих специальных радиопоглощающих покрытий. Метод основан на проведении измерений в частотной области с переходом во временную область с помощью преобразования Фурье, фильтрации и обратного перехода в частотную область. За один цикл измерений формируются данные по ЭПР в широком диапазоне частот. Приведены экспериментальные данные.

*Радиолокационная заметность, эффективная поверхность рассеивания, радиопоглощающий материал, преобразование Фурье, диаграмма, обратное рассеивание, синеграмма, безэховость.*

В настоящее время к объектам военной техники предъявляются жёсткие требования на уровень их радиолокационной заметности, который численно характеризуется величиной ЭПР. Измерение ЭПР производится на открытых измерительных полигонах либо в прецизионных безэховых камерах (ПБЭК), оборудованных коллиматором для обеспечения условий дальней зоны [1].

Измерительные полигоны в силу зависимости от погодных условий не могут обеспечить объём измерений, необходимый для экспериментальной отработки всех элементов конструкции. Стоимость создания коллиматорных ПБЭК чрезвычайно высока. Разработка и внедрение методов, позволяющих измерять ЭПР при минимальных требованиях к уровню безэховости, вплоть до обеспечения возможности измерений в помещениях, не имеющих специальных покрытий, даёт высокий экономический эффект.

В работе [2] приведено описание измерительного стенда, работа которого основана на выполнении измерений отражённого сигнала для дискретного набора частот с дальнейшим переводом результата во временную область с помощью преобразования Фурье. Фильтрация во временной области позволяет отделить сигнал, отражённый от объекта (или его элемента), от помех, вызванных отражениями от местных предметов и связью между передающим и приемным

трактами. Обратное преобразование Фурье сигнала восстанавливает в частотной области амплитуду отражённого сигнала, измеренного без помех.

В зависимости от поставленной задачи результаты измерений могут быть получены в виде:

- графика угловой зависимости усреднённого значения ЭПР для установленной полосы частот путём измерения во временной области амплитуды сигнала, отражённого от объекта (или его элемента);

- построения синограмм (графиков зависимости относительной дальности до локальных центров отражения в зависимости от угла наблюдения). Синограммы используются для выявления мест нахождения и интенсивности локальных центров отражений и построения радиолокационного портрета объекта [3];

- вычисления двумерной функции, соответствующей частотно-угловой зависимости ЭПР объекта. Результат может быть представлен в виде трёхмерного графика либо двумерных графиков зависимости ЭПР от угла наблюдения для фиксированной (квазимонохромной [4]) частоты или частотной зависимости ЭПР при фиксированном угле наблюдения. Данная функция позволяет вычислить отклик от объекта, соответствующий его облучению сигналом с заданным спектром.

Приведённые результаты получены в условиях, которые для измерений заведомо

хуже, чем существуют в обычных производственных помещениях. С одной стороны, на расстоянии около 4 м от антенны находится стена, облицованная волнистым профнастилом из алюминия, с другой стороны, на расстоянии 4,5 м – балкон с металлическими перилами. Балкон проходит и у задней стенки зала. Расстояние до него от антенны около 15 м. Измерения производились при дальности до объекта 5 м и 8 м.

Для подтверждения возможности измерений в таких условиях проведено измерение характеристик обратного рассеяния прямоугольной металлической пластины размером 200×200×4 мм. Выбор объекта обусловлен простотой получения расчётных характеристик [4] для оценки результатов измерений. Исследуемой пластине был придан небольшой прогиб в вертикальной плоскости. Стрелка прогиба равна 1,5 мм. При измерениях пластина подвешивалась на тонких нитях из кевлара к поворотной платформе стенда 50Ст-126, которая обеспечивала её вращение вокруг вертикальной оси.

На рис. 1 приведена фотография пластины и окружающей обстановки. Визуально размеры пластины кажутся несколько больше фактических, что вызвано различием расстояний до пластины и стен.



Рис. 1. Пластина на подвеске

На рис. 2 приведена диаграмма обратного рассеивания пластины (выпуклая сторона), измеренная на дальности 8 м на центральной частоте 5 ГГц и полосе свипирования 0,5 ГГц. Поляризация горизонтальная, уровень выходного сигнала принят за 0 дБ. Максимум первого бокового лепестка выше расчётного для плоской пластины на 0,2 дБ, для четвертого на 2,7 дБ, для пятого на 3,7 дБ. Для обратной стороны эти максимумы соответственно ниже. Усреднённая ошибка не превышала 0,5 дБ.

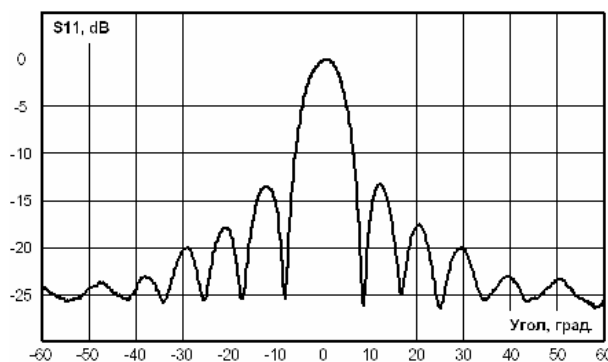


Рис. 2. Измеренная диаграмма обратного рассеивания пластины (выпуклая сторона)

Шум во временной области вызывает увеличение погрешности измерения ЭПР. Он вызван погрешностью измерения в частотной области в результате:

- шума приёмного устройства;
- конечной точности измерения и дискретности представления амплитуды и фазы входного сигнала;
- наличия отражений от окружающих предметов и неоднородностей в антенно-фидерном тракте.

Влияние первых двух факторов можно уменьшить многократным повтором измерений. Для используемого измерительного прибора это стандартная функция. Установка усреднения результатов по 100 отсчётам практически не влияет на фактическое время измерения, которое определяется допустимой скоростью вращения платформы без раскачивания объекта.

В процессе измерения на вход приёмного устройства поступает напряжение  $U_{вх} = U_c + U_{п}$ , равное векторной сумме напряжений сигнала  $U_c$  и помехи  $U_{п}$ . При измерении без исследуемого объекта на

входе приёмника действует напряжение  $U'_{вх}=U_{п}$ . Вычисляя векторную разность  $U_{вх}$  и  $U'_{вх}$ , получим входное напряжение, соответствующее сигналу. Выполнить полную компенсацию помехи не удаётся. Это вызвано погрешностью измерения с учетом, что  $U_c \ll U_{п}$ , и погрешностью установки частоты, приводящей к изменению фазы входного сигнала.

Шум уменьшается с увеличением шага перестройки частоты  $\Delta F$ . Максимально возможный шаг определяется условиями измерений. После преобразования Фурье отклик во временной области образует периодическую функцию с периодом  $T=1/\Delta F$ . В результате наложения спектра отражённые сигналы с временем задержки большим, чем  $T$ , могут попадать в диапазон дальностей до исследуемого объекта. Контроль фоновой обстановки позволяет выявить отсутствие отражённых сигналов, имеющих время запаздывания больше  $T$ .

На рис. 3,а приведена фоновая обстановка для условий размещения стенда 50Ст-126. Дальность 0 м соответствует входному соединителю антенны. Высокий уровень помехи на дальности < 4,5 м вызван отражениями в рупоре антенны и от близкорасположенных предметов. Подъём уровня помехи на дальности 14 м соответствует отражению от задней стены зала. Повышение уровня помехи на больших дальностях вызвано многократными отражениями от строительных конструкций. На дальности 4,7 м виден всплеск от эталонной сферы диаметром 100 мм, используемой для оценки уровня фона.

На рис. 3,б приведена фоновая обстановка после компенсации сигнала помехи. Как видно из рисунка, уровень отражённого сигнала от раскрыва антенны снизился на 30 дБ, средний уровень фона снизился на 15 дБ. Уровень сигнала, отражённого от сферы, не изменился.

На рис. 4,а приведена синопграмма [3] пластины при облучении волной с вертикальной поляризацией, а на рис. 4,б – горизонтальной. Измерение произведено при свипировании частоты от 1 ГГц до 12 ГГц с шагом  $\Delta F=6,875$  МГц. Время измерения около трёх минут.

Измеренные синопграммы согласуются с [5] для углов, отличных от  $0^\circ$  (зеркальное отражение), основной вклад в ЭПР вносят отражения от кромок.

Амплитуда крайних зеркальных максимумов примерно на 10% меньше амплитуды среднего за счёт эффекта прогиба исследуемой пластины. При облучении изогнутой пластины сферической волной выпуклая сторона вызывает дополнительное рассеяние отраженного луча, а вогнутая – его фокусировку. При облучении плоской волной эти максимумы одинаковы. Данный приём позволяет оценить погрешность от невыполнения условий дальней зоны.

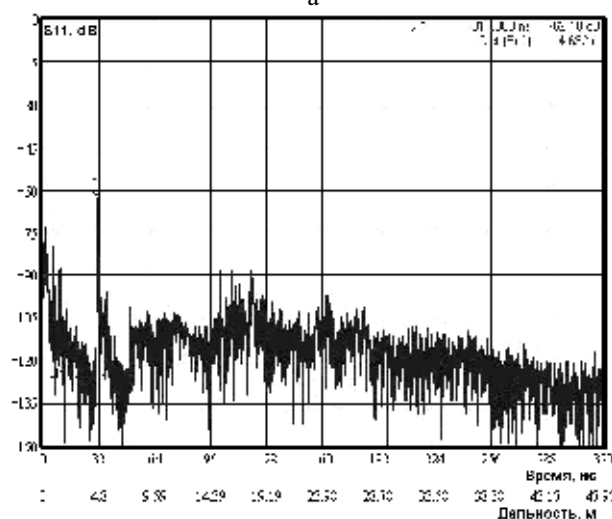
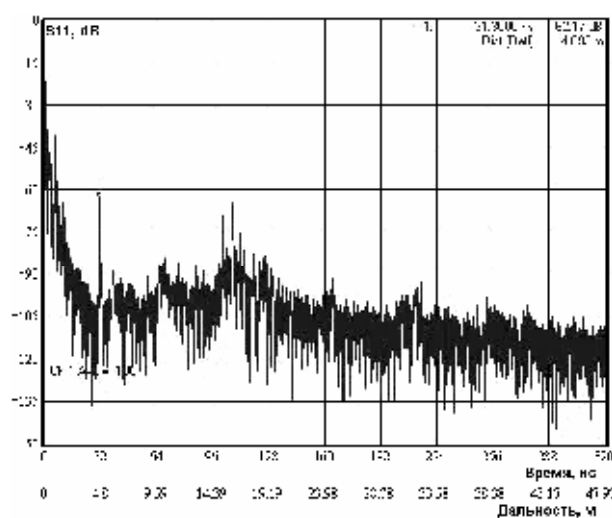


Рис. 3.: а – фоновая обстановка во временной области; б – фоновая обстановка во временной области с компенсацией фона

Для обеспечения пространственной селекции измерения необходимо проводить в достаточно широком диапазоне частот. Результат измерений – усреднённая

величина рассеивания для выбранного диапазона. ЭПР объектов, содержащих частотно-избирательные элементы (антенны, обтекатели и т.д.), может существенно отличаться от усреднённой величины.

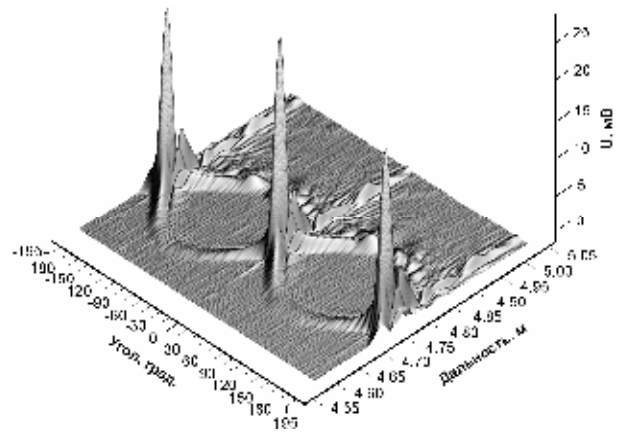
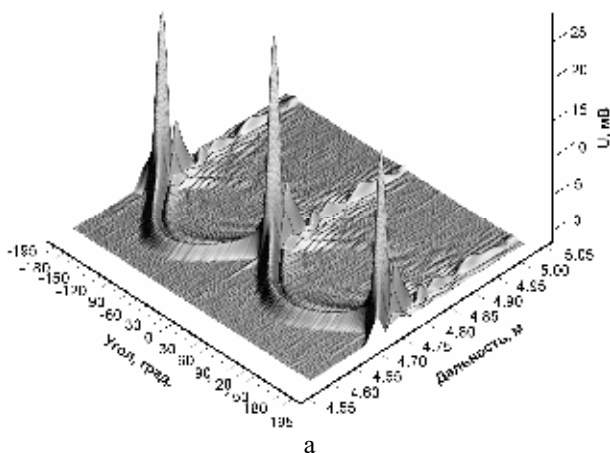
При необходимости получения частотной зависимости ЭПР выполним временное стробирование (фильтрацию), для чего обнулим амплитуду отсчётов, за исключением интервала, в котором находится отражённый от объекта сигнал. После преобразования Фурье последовательности временных отсчётов получим коэффициенты  $U_c(F_n, \varphi)$ , которые соответствуют напряжению на входе приёмника на частоте  $F_n$  при угле облучения  $\varphi$ , измеренному без помех от окружающей обстановки (за исключением помех и шума, совпадающих по времени со стробом). Форма фронтов строба не оказывает существенного влияния на результат преобразования – они расположены на интервалах, где уровень сигнала близок к нулю.

Для калибровки полученных данных выполним аналогичные измерения для эталонного сферического отражателя и получим  $U_3(F_n)$ . Зависимость от угла облучения здесь отсутствует. В рассматриваемом случае калибровка должна быть выполнена в виде (1):

$$\sigma(F_n, \varphi) = \sigma_3(F_n) \cdot \left( \frac{|U_c(F_n, \varphi)|}{|U_3(F_n)|} \right)^2, \quad (1)$$

$$n = 1, \dots, N,$$

где:  $\sigma(F_n, \varphi)$  – ЭПР для частоты  $F_n$  при угле облучения  $\varphi$ ;  $\sigma_3(F_n)$  – расчётная ЭПР эталонного отражателя.



б

Рис. 4. Синограммы пластины размером 200×200×4 мм: а – при облучении волной с вертикальной поляризацией; б – при облучении волной с горизонтальной поляризацией

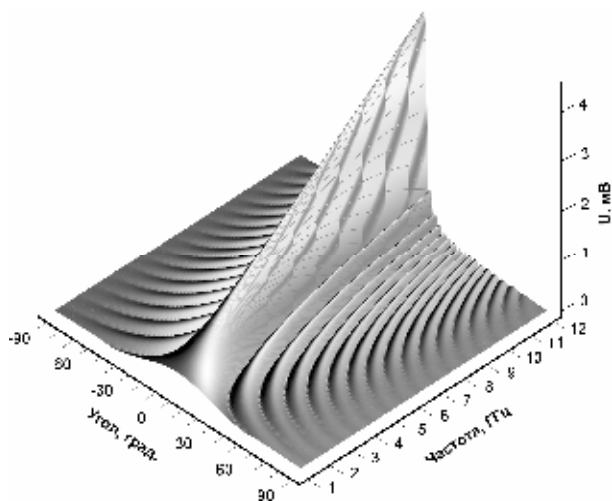
Отметим, что идентичность набора частот и положения строба компенсирует частотную характеристику измерительного тракта.

На рис. 5,а приведен расчётный график, а на рис. 5,б – результаты измерений ЭПР металлической пластины при вертикальной поляризации. С целью повышения наглядности амплитуда сигнала на графиках пропорциональна входному напряжению (т. е.  $\sqrt{\sigma}$ ).

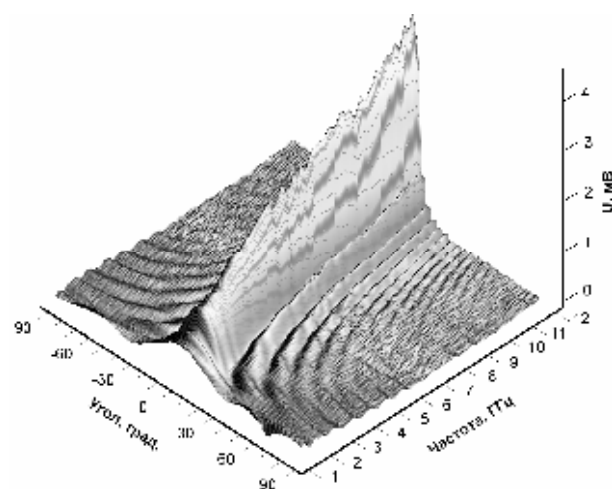
Синхронность флуктуации амплитуды зеркального максимума и первых боковых лепестков показывает, что она вызвана погрешностью измерения (или расчёта) ЭПР эталонного отражателя.

Для объектов, имеющих резонансные структуры, трёхмерные графики позволяют быстро оценить их частотно-угловые характеристики. В качестве примера на рис. 6 приведена измеренная диаграмма рассеяния пластины 520×520×15 мм из фторопласта-4.

Полуволновый слой диэлектрика обеспечивает максимальную радиопрозрачность, что хорошо видно на графике по минимуму зеркального отражения на частоте 7,2 ГГц.



а



б

Рис. 5. Зависимости обратного рассеивания пластины 200×200×4 мм от частоты и угла наблюдения:  
а – расчётное значение; б – измеренное значение

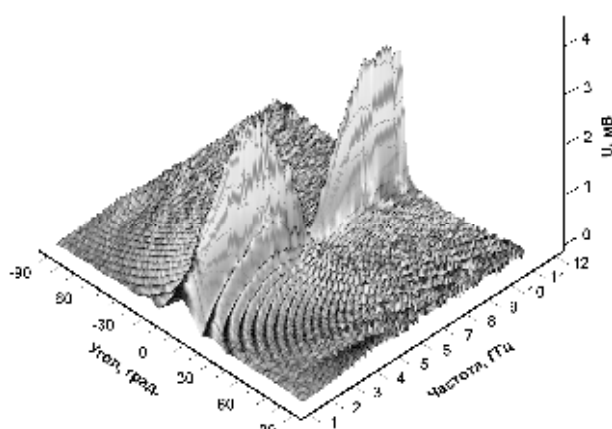


Рис. 6. Зависимость обратного рассеивания пластины из фторопласта от частоты и угла наблюдения

Характеристики радиопоглощающих материалов (РПМ) зависят от частоты. На рис. 7 приведена трёхмерная диаграмма рассеяния металлической пластины 200×200×4 мм, покрытой слоем РПМ. Уровень сигнала при нулевом угле облучения характеризует зависимость коэффициента зеркального отражения РПМ от частоты. Амплитуды боковых лепестков не уменьшились – материал не обеспечивает затухания поверхностных волн. Главный максимум не расширился – уровень диффузного отражения у материала незначителен.

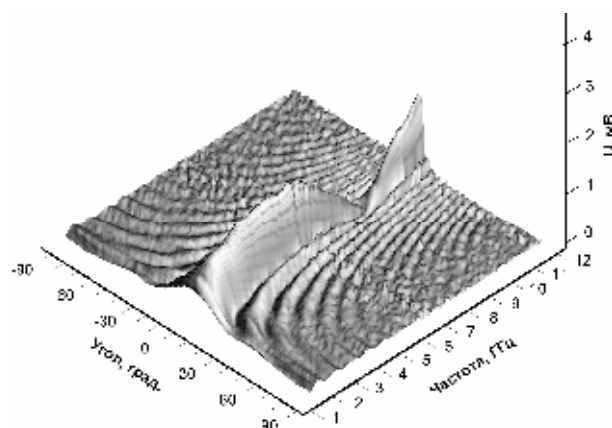


Рис. 7. Зависимость обратного рассеивания пластины, покрытой слоем РПМ, от частоты и угла наблюдения

Таким образом, рассмотренный метод позволяет измерять ЭПР объектов в условиях производственных помещений без использования радиопоглощающих покрытий. За один цикл измерений (оборот платформы стенда) измеряется ЭПР исследуемого объекта как двумерная функция от угла наблюдения и частоты сигнала. Соответствующие выборки представляют угловую зависимость ЭПР при фиксированной частоте или частотную характеристику при фиксированном угле облучения.

**Библиографический список**

1. Львова, Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов [Текст] / Л. А. Львова. – Снежинск: СФЯЦ-ВНИИТФ, 2003.
2. Бачурин, В. С. Стенд 50Ст-126 для отработки радиолокационной заметности элементов изделия [Текст] / В. С. Бачурин, Д. М. Батухтин // Научно-технический сборник «Проектирование и производство летательных аппаратов». – Екатеринбург, 2006. – С. 117-120.
3. Фархат, Н. Х. Формирование радиолокационного изображения методом разнесения в диапазоне СВЧ и автоматизированная идентификация целей, основанная на использовании моделей нейронных сетей [Текст] / Н. Х. Фархат // ТИИЭР. – 1989. – Т.77. – С. 43-56.
4. Кобак, В. О. Радиолокационные отражатели [Текст] / В. О. Кобак. – М.: Советское радио, 1975.
5. Уфимцев, П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции [Текст] / П. Я. Уфимцев. – М.: Советское радио, 1962.

**References**

1. Lvova, L. A. Aircraft radar visibility / L. A. Lvova. – Snezhinsk: SFYC-VNIITF, 2003.
2. Batchurin, V. S. Stand 50St-126 for trying out the radar visibility of product elements / V. S. Batchurin, D. M. Batukhtin // Collection of scientific and engineering papers “Design and production of aircraft”. – Yekaterinburg, 2006. – pp. 117-120.
3. Farkhat, N. Kh. Forming a radar image by means of separation in the UHF range and automated target identification based on the use of neural networks models / N. Kh. Farkhat // TEEER. – 1989. – Vol.77. – pp. 43-56.
4. Kobak, V. O. Radar reflectors / V. O. Kobak. – Moscow: Sovetskoye radio (Soviet radio), 1975.
5. Ufimtsev, P. Ya. Border wave method in the physical theory of diffraction / P. Ya. Ufimtsev. – Moscow: Sovetskoye radio (Soviet radio), 1962.

**MEASURING SCATTERING CROSS-SECTION UNDER POOR ANECHOIC CONDITIONS**

© 2010 V. S. Batchurin, D. M. Batukhtin, V. D. Pyshnyj

Joint Stock Company “Experimental Design Bureau “Novator”, Yekaterinburg

The paper deals with a technique that makes it possible to measure the scattering cross-section of objects in production rooms having no special radioabsorbing surfaces. The technique is based on measurements in the frequency domain with the transition to the time domain using Fourier transformations, filtration and inverse transition to the frequency domain. Data on scattering cross-section are obtained in a wide range of frequencies in one cycle of measurements. Experimental data are presented.

*Radar visibility, scattering cross-section, radioabsorbing material, Fourier transformation, diagram, backward scattering, sinegram, anechoecy.*

**Информация об авторах**

**Бачурин Владимир Сергеевич**, начальник конструкторского отдела антенно-фидерных устройств ОАО «ОКБ «Новатор», [ellips@ural.ru](mailto:ellips@ural.ru). Область научных интересов: дифракция электромагнитных волн, снижение радиолокационной заметности, цифровая обработка сигналов.

**Батухтин Данил Михайлович**, инженер-конструктор ОАО «ОКБ «Новатор», [ellips@ural.ru](mailto:ellips@ural.ru). Область научных интересов: дифракция электромагнитных волн, снижение радиолокационной заметности, цифровая обработка сигналов.

**Пышный Валерий Дмитриевич**, заместитель начальника конструкторского отдела антенно-фидерных устройств ОАО «ОКБ «Новатор», [ellips@ural.ru](mailto:ellips@ural.ru). Область научных интересов: проблемы снижения радиолокационной заметности, спутниковая навигация, системы измерений.

**Batchurin Vladimir Sergeyevitch**, head of design department of antenna-feeder devices, “Novator” design bureau, [ellips@ural.ru](mailto:ellips@ural.ru). Area of research: diffraction of electromagnetic waves, reduction of radar visibility, digital signal processing.

**Batukhtin Danil Mikhailovitch**, design engineer, “Novator” design bureau, [ellips@ural.ru](mailto:ellips@ural.ru). Area of research: diffraction of electromagnetic waves, reduction of radar visibility, digital signal processing.

**Pyshnyj Valery Dmitrievitch**, deputy head of the design department of antenna-feeder devices, “Novator” design bureau, [ellips@ural.ru](mailto:ellips@ural.ru). Area of research: problems of radar visibility reduction, satellite navigation, measurement systems.