

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЛОКАТОРА МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ СО СТУПЕНЧАТОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ РАБОТЕ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ

*На основе математической модели исследовано влияние интерференции из-за переотражений зондирующих сигналов со ступенчатой частотной модуляцией от поверхностей пола, потолка и стен на работу радиолокатора малой дальности внутри помещений при наблюдении целей, имеющих малые периодические перемещения. Выявлены структура интерференционных отметок от цели и требования к разрешающей способности по задержке и ширине полосы зондирующих сигналов, при которых не происходит интерференционного замирания и сдвига по дальности отметок от цели. Представлены данные натурных лабораторных экспериментов, полученные на макете степ-ЧМ радиолокатора при наблюдении колебаний физических маятников и дышащего человека. Проведено обсуждение полученных результатов.*

В ряде практических приложений радиолокации возникает необходимость оценки работы радиолокационных систем (РЛС) малой дальности при использовании широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) зондирующих сигналов (ЗС). Примерами таких приложений, актуальных в настоящее время, являются: обнаружение людей за радиопрозрачными препятствиями (стенами, растительностью, и т. п.) в антитеррористических операциях; обнаружение человека в завалах при обрушении зданий и ведении спасательных работ; дистанционное или бесконтактное выделение реализаций дыхания и сердцебиения человека при определении психоэмоционального состояния и в медицинских приложениях.

Типовыми ЗС, используемыми в ближней радиолокации, могут быть непрерывные немодулированные (монокроматические) сигналы (НС); ШП и СШП непрерывные и квазинепрерывные сигналы — когерентно-импульсные, сигналы с линейной или ступенчатой частотной модуляцией (ЛЧМ или степ-ЧМ) [1]; СШП видеоимпульсные сигналы (ВИС) [2].

Преимуществом ШП и СШП ЗС по сравнению с НС в задачах наблюдения малоподвижных объектов, возможно, имеющих периодические перемещения поверхности в такт дыханию и сердцебиению, является разделение интервала дальности на ячейки, что позволяет измерять дальность до объекта, и более эффективно селективировать полезные сигналы на фоне отражений от местных предметов (МП).

Непрерывные и квазинепрерывные ШП и СШП ЗС сочетают в себе большие по сравнению с СШП ВИС среднюю мощность излучения и дальность действия РЛС с возможностью измерения и селекции по дальности.

При использовании РЛС малой дальности внутри помещений имеют место зеркальные переотражения зондирующего и отраженного целью сигнала от больших поверхностей пола, потолка и стен, а также от находящихся в помещении местных предметов. Подобные переотраженные сигналы, проходя по пути “РЛС–неподвижная точка отражения–цель–РЛС”, модулируются подвижной целью и могут иметь практически тот же спектральный состав, что и прямой отраженный от цели сигнал, прошедший по пути “РЛС–цель–РЛС”, и, следовательно, не могут быть отрежектированы в традиционной системе селекции движущихся целей (СДЦ). Интерференция прямого и переотраженного сигналов может при определенных условиях приводить к искажению дальностной информации на выходе системы обработки сигналов (расширению, пропаданию и появлению ложных отметок). Ввиду заранее не известного положения цели и точек переотражения подавление такой интерференции представляется сложной задачей, которая в общем случае должна решаться на основе методов пространственно-временной адаптации.

Для РЛС малой дальности, использующих непрерывные ШП и СШП сигналы со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ, степ-ЧМ), изучение эффектов переотражения и интерференции и способов их подавления и селекции цели на их фоне представляется важной задачей. В настоящей работе решена первая часть задачи, а именно предложена математическая модель для анализа переотражений от зеркальных точек пола, потолка и стен помещения, в котором установлен степ-ЧМ радиолокатор, а также приведены результаты лабораторных экспериментов на созданном макете степ-ЧМ радиолокатора.

**Математическая модель обработки СЧМ сигналов при учете отражений от поверхностей внутри помещения.** В интересах анализа влияния переотражений на систему СДЦ РЛС малой дальности с одиночными приемной и передающей антеннами была создана математическая модель, учитывающая основные, наиболее интенсивные переотражения внутри помещения, обусловленные зеркальными отражениями от больших плоских поверхностей, а именно пола, потолка и стен. Зеркальные отражения рассчитывались методом геометрической оптики с учетом эквивалентных коэффициентов отражения Френеля [3] в зеркальных точках в плоскостях пола, потолка и стен, число которых для прямоугольной комнаты равно 6. Координаты зеркальных точек определялись с учетом положения приемопередающей ан-

тенны РЛС и положения цели. Выражение для комплексной амплитуды  $m$ -й частотной компоненты принимаемого сигнала на частоте  $\omega_m = 2\pi(f_0 + m\Delta f)$ , где  $m = 0, \dots, M$  и  $\Delta f$  — шаг частотных компонент, с учетом интерференции от 6 зеркальных точек имеет вид:

$$\dot{U}_m(t) = A_0 \left[ \sum_{n=0}^6 q_n \exp \{ -j\omega_m \tau_n(t) \} \right]^2; \quad (1)$$

здесь  $A_0$  — амплитуда принимаемого сигнала;  $q_n$ ,  $n = 0, 1, \dots, 6$  — относительные интенсивности отражений от цели ( $q_0 = 1$ ), пола ( $q_1$ ), потолка ( $q_2$ ), левой и правой стен ( $q_3$  и  $q_4$ ), передней и задней стен ( $q_5$  и  $q_6$ ), причем  $q_n < 1$  при  $n \geq 1$ ;  $\tau_n(t)$  — задержка сигнала на  $n$ -м пути распространения:

$$\tau_n(t) = \frac{1}{c} R_n(t) = \frac{1}{c} \left| \vec{r}_T(t) - \vec{r}_A^{(n)} \right|, \quad n = 0, 1, \dots, 6, \quad (2)$$

где  $R_0(t)$  — текущая дальность “антенна–цель”;  $R_n(t)$  (при  $n \geq 1$ ) — дальность пути “антенна– $n$ -я зеркальная точка–цель”;  $\vec{r}_T(t)$  — текущий вектор координат эквивалентной цели, которая совершает малые периодические перемещения относительно точки, задаваемой вектором  $\vec{r}_{T0}$ ,

$$\vec{r}_T(t) = \vec{r}_{T0} + \vec{\Delta}_b \sin(\Omega_b t) + \vec{\Delta}_h \sin(\Omega_h t); \quad (3)$$

$\vec{r}_{T0} = \|x_{T0}, y_{T0}, z_{T0}\|^T$  — вектор средних координат цели;  $\vec{r}_A^{(n)}$  — векторы координат антенны (при  $n = 0$ ) и ее зеркальных отражений (при  $n \geq 1$ ) в плоскостях пола, потолка и стен:

$$\begin{aligned} \vec{r}_A^{(0)} &= \|x_A, y_A, z_A\|^T, & \vec{r}_A^{(1)} &= \|x_A, y_A, -z_A\|^T, \\ \vec{r}_A^{(2)} &= \|x_A, y_A, 2z_0 - z_A\|^T, & \vec{r}_A^{(3)} &= \|x_A, -y_A, z_A\|^T, \\ \vec{r}_A^{(4)} &= \|x_A, 2y_0 - y_A, z_A\|^T, & \vec{r}_A^{(5)} &= \|-x_A, y_A, z_A\|^T, \\ & & \vec{r}_A^{(6)} &= \|2x_0 - x_A, y_A, z_A\|^T, \end{aligned} \quad (4)$$

причем  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  — длина, ширина и высота комнаты, имеющей форму параллелепипеда, который располагается ребрами на осях прямоугольной системы координат с левой нижней вершиной в начале координат.

В выражении (3) векторы смещений  $\vec{\Delta}_b$  и  $\vec{\Delta}_h$  эквивалентной цели с амплитудами  $\Delta_{b0}$ ,  $\Delta_{h0}$  и частотами  $\Omega_b$ ,  $\Omega_h$  дыхания и сердцебиения могут иметь одинаковые направления, которые для определенности принимались совпадающими с направлением “антенна–цель”, т.е.

$$\vec{\Delta}_b = \frac{\vec{r}_{T0} - \vec{r}_A^{(0)}}{\left| \vec{r}_{T0} - \vec{r}_A^{(0)} \right|} \Delta_{b0}, \quad \vec{\Delta}_h = \frac{\vec{r}_{T0} - \vec{r}_A^{(0)}}{\left| \vec{r}_{T0} - \vec{r}_A^{(0)} \right|} \Delta_{h0}. \quad (5)$$

В основных чертах модель, описываемая выражением (3), может имитировать периодические смещения поверхности тела человека в такт дыханию и сердцебиению.

В некоторый момент времени  $t_k = kT_r$  ( $T_r$  — период повторения пачек СЧМ сигнала,  $k$  — номер текущего периода повторения СЧМ сигнала). При отсутствии взвешивания частотных компонент комплексный корреляционный интеграл (комплексный профиль дальности) для сигнала (1) при условном значении  $A_0 = 1$  имеет вид:

$$\dot{Q}_k(\tau) \approx \sum_{m=0}^M \dot{U}_m(t_k) \exp(j\omega_m \tau), \quad (6)$$

где  $\tau$  — ожидаемая задержка, выставленная в опорном сигнале системы обработки.

После подстановки выражения (1) в дискретное преобразование Фурье (ДПФ) (6) последнее вычисляется аналитически:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_k(\tau) &\approx \\ &\approx \sum_{n1, n2=0}^6 q_{n1} q_{n2} \exp \left\{ -j \left( \omega_0 + \frac{M}{2} \Delta\omega \right) (\tau_{n1}(t_k) + \tau_{n2}(t_k) - \tau) \right\} \times \\ &\quad \times \frac{\sin \left[ \frac{\Delta\omega (M+1)}{2} (\tau_{n1}(t_k) + \tau_{n2}(t_k) - \tau) \right]}{\sin \left[ \frac{\Delta\omega}{2} (\tau_{n1}(t_k) + \tau_{n2}(t_k) - \tau) \right]}. \quad (7) \end{aligned}$$

При использовании СЧМ зондирующего сигнала выражения (6) и (7) являются приближенными вследствие того, что моменты взятия отсчетов частотных компонент  $\dot{U}_m(t)$  приведены к единому моменту времени  $t_k$ . Последнее возможно при медленном изменении во времени расстояния (3) и, следовательно, задержки (2) по сравнению с длительностью пачки СЧМ сигнала, равной  $MT_\omega$  ( $T_\omega$  — длительность импульса одной частотной компоненты). Более точный результат можно получить, беря отсчеты частотных компонент в середине импульса каждой частотной компоненты. Однако в этом случае ДПФ не вычисляется аналитически в виде (7) и его следует вычислять численно с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). С учетом равенства  $\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi m \Delta f + 2\pi f_0$  и использованием замены непрерывной задержки  $\tau$  дискретной переменной  $p$  ( $p = 0, \dots, M$ ), согласно формуле  $\tau \approx p \times [(M+1) \Delta f]^{-1}$ , можно получить ДПФ в виде

$$\dot{Q}_k(p) = \exp \left( j \frac{2\pi f_0 p}{(M+1) \Delta f} \right) \sum_{m=0}^M \dot{V}_{m,k} \exp \left( j \frac{2\pi}{(M+1)} m p \right), \quad (8)$$

где  $\dot{V}_{m,k} = \dot{U}_m(kT_r + (m+0,5)T_\omega)$ , причем сумма в выражении (8) вычисляется с помощью процедуры БПФ.

Дальнейшая обработка по обзорам  $k = 0, \dots, K$  на большом интервале наблюдения длиной  $KT_r$  в целях выявления спектральных

компонент периодических смещений цели или компонент дыхания и сердцебиения при наблюдении человека может осуществляться также с помощью БПФ от  $\dot{Q}_k(p)$  по дискретной переменной  $k$  для каждой фиксированной ячейки дальности  $p$ :

$$\dot{S}(p, v) = \sum_{k=0}^K \dot{Q}_k(p) \exp\left(j \frac{2\pi}{(K+1)} vk\right) = FFT_k \left\{ \dot{Q}_k(p) \right\}. \quad (9)$$

Результатом является двумерная матрица “дальность–частота”  $S_{p,v} = \left| \dot{S}(p, v) \right|$  в плоскости номера ячейки дальности  $p$  и номера спектральной компоненты  $v$ . В этой матрице возможные отклики прямых сигналов от неподвижных МП, расположенных в разных ячейках задержки (дальности), находятся на нулевых и близких к нулю спектральных компонентах при  $v = 0, 1$  [4, 5]. В выражении (1) такие отклики не учтены в силу постановки данной задачи. Отклики от живых объектов содержат спектральные компоненты при значениях  $v \geq 2$  и отвечают частотам дыхания и сердцебиения и их гармоникам. В отсутствие интерференционных переотражений через цель отклики живых объектов могут быть отсеleктированы по частоте на фоне отражений от местных предметов и находиться на истинных дальностях. Об этом свидетельствуют изложенные в работах [4, 5] результаты моделирования. В то же время сигналы из-за переотражений через цель по частоте не селектируются, и появляются дополнительные отметки, или расширение отметок по дальности, о чем свидетельствует и формула (7) и результаты моделирования по формулам (8) и (9), приводимые ниже.

Для лучшего понимания влияния переотражений рассмотрим интерференцию прямого сигнала и переотражения от единственной зеркальной точки. Пусть она расположена в плоскости пола между антенной РЛС и целью. Принимая во внимание выражение для волновых чисел  $k_m = \omega_m/c$  на частотах  $\omega_m$  и учитывая формулу (1) при наличии только первых двух слагаемых с  $n = 0, 1$ , после возведения в квадрат получим:

$$\dot{U}_m = q_0^2 \exp(-jk_m 2R_0) + 2q_0q_1 \exp(-jk_m(R_0 + R_1)) + q_1^2 \exp(-jk_m 2R_1). \quad (10)$$

Отсюда следует, что при одной зеркальной точке после фокусировки частотных компонент (10) по всем  $M + 1$  частотам будут получены три отметки: истинная отметка на дальности цели  $R_0$  с интенсивностью  $q_0^2$ , отметка за счет пути “антенна–зеркальная точка–цель” на дальности  $R_1$  с интенсивностью  $q_1^2$  и комбинационная отметка на дальности  $(R_0 + R_1)/2$  с интенсивностью  $2q_0q_1$ , лежащая посередине

между первыми двумя. При условных значениях  $q_0 = 1$  и  $q_1 = 0,8$  получаем, что интенсивность комбинационной отметки ( $2q_0q_1 = 1,6$ ) заметно превосходит интенсивности истинной ( $q_0^2 = 1,0$ ) и зеркальной ( $q_1^2 = 0,64$ ) отметок. Можно также заключить, что для успешной селекции истинной отметки при дальности  $R_0$ , меньшей  $R_1$  и  $(R_0 + R_1)/2$ , потребуется разрешающая способность по дальности  $\delta r$ , удовлетворяющая неравенству

$$\delta r < \frac{R_0 + R_1}{2} - R_0 = \frac{R_1 - R_0}{2}, \quad (11)$$

а не более мягкому условию  $\delta r < R_1 - R_0$ , которого можно было бы ожидать, исходя из геометрических расстояний “антенна–цель” и “антенна–зеркальная точка–цель”. При невыполнении условия (11) возможны наложение и интерференция всех трех перечисленных отметок, что, в свою очередь, может привести не только к расширению отметки по дальности, но и к ее дроблению при одновременном пропадании отметки на истинной дальности цели. Вполне очевидной мерой борьбы с отмеченными явлениями может быть расширение общей полосы частот СЧМ ЗС  $\Delta F = M\Delta f$ .

Проанализируем разные варианты характеристик РЛС, различающиеся шириной полосы и количеством частот степ-ЧМ сигнала, соответствующих бóльшим и меньшим размерам элемента разрешения  $\delta r$ , при однозначной дальности  $R_{\max}$  и одних и тех же параметрах внешней обстановки. В качестве отправного варианта 1 примем вариант упрощенного макета радиолокатора малой дальности с невысокими характеристиками разрешения по дальности: частота начальной частотной компоненты СЧМ сигнала  $f_0 = 1,528$  ГГц, частотный разнос начальной и конечной частотных компонент  $\Delta F = 224$  МГц при шаге по частоте  $\Delta f = 14,9$  МГц, числе частотных компонент  $M + 1 = 16$ , разрешении по дальности  $\delta r = 0,67$  м и однозначной дальности  $R_{\max} = 10$  м. Другие варианты отвечают параметрам радиолокаторов с улучшенными характеристиками разрешения по дальности при частоте начальной частотной компоненты СЧМ сигнала  $f_0 = 2$  ГГц. Номера вариантов и их основные характеристики приведены в таблице.

Предварительно моделирование откликов на выходе системы обработки проводилось при дальности “антенна–цель” 2 м, на равных высотах антенны и цели  $z_{T0} = z_A = 1$  м и при учете одной зеркальной точки с коэффициентом отражения  $q_1 = 0,8$ . Параметры смещения цели в выражении (3):  $\Omega_b/2\pi = 0,2$  Гц;  $\Omega_h/2\pi = 1$  Гц;  $\Delta_{b0} = 0,5$  см;  $\Delta_{h0} = 0,5$  мм. Результаты показаны на рис. 1, а, б, в соответственно для вариантов 1, 2 и 3.

## Варианты характеристик степ-ЧМ радиолокатора

Вариант	Параметр				
	Начальная частота $f_0$ , МГц	Диапазон частот $\Delta F$ , МГц	Число частот $M + 1$	Разрешение по дальности $\delta r$ , м	Однозначная дальность $R_{\max}$ , м
1	1528	224	16	0,67	10,0
2	2000	441	64	0,34	21,4
3	2000	889	64	0,17	10,6

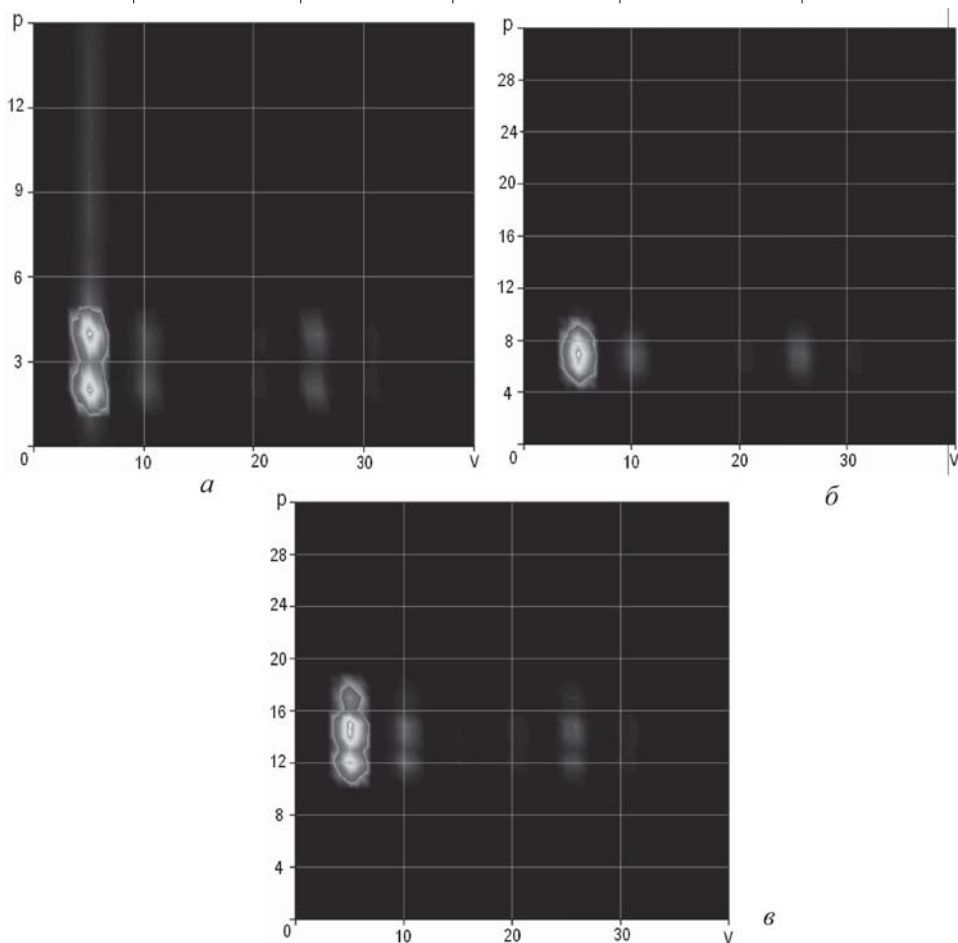


Рис. 1. Топографическая диаграмма откликов в плоскости “частота–дальность” для вариантов 1, 2 и 3 (а, б и в соответственно) при дальности до цели 2 м и одной точке зеркального отражения (цена деления по дальности на вертикальной оси  $\delta r = 0,67$  (а);  $0,34$  (б) и  $0,17$  м (в); разрешение по частоте  $0,04$  Гц)

На рис. 1, а видно дробление отметки, вызванное интерференцией отметки цели, комбинационной и зеркальной отметок. На истинной дальности до цели, равной 2 м и соответствующей 3-й ячейке по вертикальной оси, имеет место провал, а максимумы расположены во 2-й

и 4-й ячейках на дальностях 1,34 и 2,67 м. По оси частот наблюдаются спектральные отметки дыхания и сердцебиения. Рис. 1, б соответствует увеличению полосы и улучшению разрешения по дальности примерно в 2 раза. Видно, что истинная и интерференционные отметки сливаются, что приводит как к расширению отметки по дальности, так и к ее некоторому сдвигу в сторону более дальних комбинационных отметок. Вызванное интерференцией от зеркальной точки смещение центра результирующей отметки в данном случае составило одну ячейку дальности, т.е. величину 0,34 м в сторону удаления относительно истинной дальности цели. Дальнейшее увеличение полосы до 889 МГц и улучшение разрешения до  $\delta r = 0,17$  м (рис. 1, в) приводит к разрешению всех трех отметок между собой и расположению их на отвечающих им дальностях. Это позволяет выделить дальность цели, равную 2 м по первой, истинной отметке, и логически отсементировать ложные отметки, расположенные на больших дальностях — 2,41 и 2,83 м.

В заключение приведем результаты моделирования РЛС при учете всех шести точек зеркального отражения (от пола, потолка и четырех стен) при различной частотной полосе СЧМ и, следовательно, различном разрешении по дальности. Размеры (в метрах) комнаты, положения антенны и цели, используемые в выражениях (3), (4):  $\|x_0, y_0, z_0\| = \|8, 4, 6\|$ ;  $\vec{r}_A^{(0)} = \|4, 3, 1\|$ ;  $\vec{r}_{T0} = \|2, 3, 1\|$ . Вектор коэффициентов отражения  $\vec{q} = \|1; 0,8; 0,4; 0,5; 0,5; 1,0; 0,4\|$ . Длительность спектрального анализа 25 с.

На рис. 2, а и б приведены результаты для вариантов 1 и 3 согласно таблице, при дальности до цели 2 м. Из рис. 2, а следует, что при

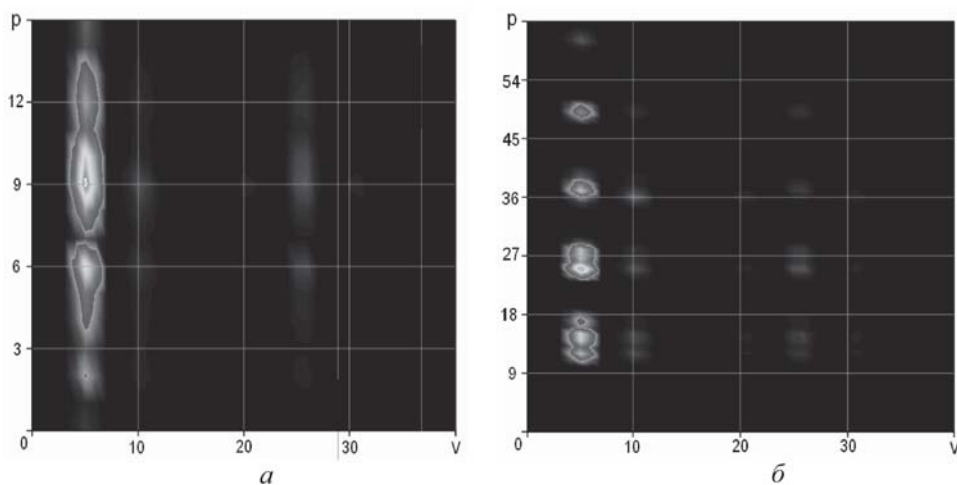


Рис. 2. Диаграмма откликов в плоскости “частота–дальность” для вариантов 1 и 3 при дальности до цели 2 м с учетом всех зеркальных отражений,  $\Delta F = 224$  (а); 889 МГц (б);  $\delta r = 0,67$  (а); 0,17 м (б) соответственно



относительно большом дальностном элементе разрешения имеет место интерференционная картина отметок, в которой отметка истинного положения цели в 3-й ячейке дальности отсутствует в результате интерференции за счет наложения сигналов блестящих точек из данного и соседних элементов дальности.

При расширении частотной полосы до  $\Delta F = 889$  МГц картина отметок становится существенно более детальной, что приводит к полному разрешению цели и всех зеркальных отражений по дальности, которые при высокой разрешающей способности перестают интерферировать между собой. Это позволяет измерить истинную дальность одиночной цели по удалению первой отметки.

**Результаты лабораторных экспериментов на макете радиолокатора.** Для проведения лабораторных экспериментов был создан прототип проектируемого радиолокатора, общий вид которого показан на рис. 3.

Макет имел основные характеристики, отвечающие варианту 1 в таблице. Некоторые дополнительные характеристики зондирующего сигнала и системы обработки имели следующие значения.

1. Длительности компонентных импульсов опорного и зондирующего степ-ЧМ сигналов:  $T_w = 250$  мкс.

2. Длительность и период повторения многочастотных пачек СЧМ сигнала:  $T_r = 4$  мс.

3. Число накапливаемых пачек и полное время наблюдения  $K + 1 = 8192$  и  $KT_r = 32,8$  с, что соответствует разрешению по частоте  $\delta f = 0,03$  Гц.

Лабораторные эксперименты проводились в помещении размера-ми  $8,5 \times 5,1$  м, содержащем большое число отражающих МП. Учет их расстояний и ориентации относительно биорадиолокатора и подвижного обнаруживаемого объекта не проводился ввиду сложной формы и протяженности МП (шкафы, стеллажи, стойки с приборами и т.п.), которые все равно не позволили бы оценить доминирующие точки отражения. В качестве обнаруживаемых объектов выступали как искусственные цели в виде колеблющихся маятников, так и дышащий



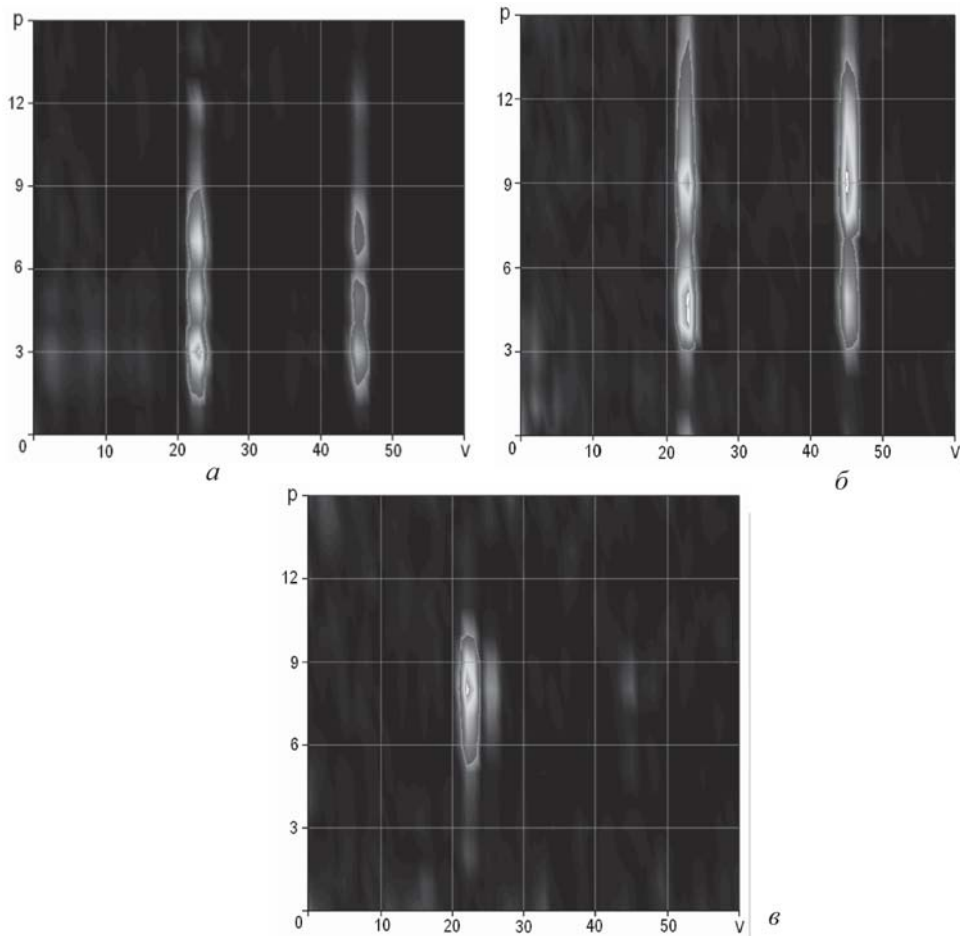
Рис. 3. Внешний вид макета проектируемого степ-ЧМ радиолокатора

человек. Как правило, цель располагалась перед специальным поглощающим покрытием, экранирующим в основном отражения от задней стены помещения. При расстояниях более 200 см проводились также эксперименты с расположением цели без использования поглощающего покрытия, когда цель и радиолокатор разделялись открытым проемом между двумя смежными комнатами.

В качестве искусственной цели использовался колеблющийся маятник с грузом в виде круглого металлического горизонтального стержня диаметром 1,2 см и длиной 45 см на подвесе из двух капроновых лесок длиной 90 см. Другим видом груза являлась также металлическая пластина размером 13×13 см. Амплитуды колебаний маятников составляли порядка 0,5...1,0 см. Высота подвеса маятника и высота установки антенной системы биорадиолокатора над полом были равны 0,95 м.

В процессе экспериментов при работе биорадиолокатора в реальном масштабе времени записывались 12-разрядные отсчеты двух выходных низкочастотных квадратурных реализаций по каждой из 16 частот СЧМ сигнала на интервале времени 32,8 с, прошедших фильтрацию в аналоговых режекторных фильтрах. Полученные в каждом опыте массивы данных обрабатывались в ПЭВМ по алгоритму (9) с задержкой по времени. Время вычисления одной топографической диаграммы “частота–дальность” составляло единицы секунд.

Первая серия экспериментов проводилась по обнаружению колеблющихся маятников, располагаемых на различных расстояниях от радиолокатора в пределах от 2 до 4 м. Результаты обработки имели, как и в случае математического моделирования, вид топографических диаграмм модуля двумерного БПФ в плоскости “частота–дальность”, где частота откладывалась в виде номера частотного отсчета по горизонтальной оси, а дальность — в виде номера ячейки дальности по вертикальной оси. В качестве примера на рис. 4, а и б приведены результаты экспериментов с колеблющимся маятником в виде горизонтально подвешенного стержня на расстоянии соответственно 2 и 3 м от радиолокатора. На рис. 4, а положение первого максимума в 3-й ячейке дальности отвечает фактической средней дальности до маятника, остальные максимумы на больших дальностях, по всей видимости, отвечают переотражениям от удаленных предметов и поверхностей в лабораторном помещении. По частоте видны два максимума в 23 и 46-й ячейках для первой и второй гармоник колебаний маятника, равных примерно 0,7 и 1,4 Гц соответственно. Эти данные достаточно точно соответствуют действительным параметрам цели. На рис. 4, б первая отметка по дальности имеет протяженный характер и располагается в 4 и 5-й ячейках, а ее “центр тяжести” отвечает истинной дальности до цели.



**Рис. 4.** Топографическая диаграмма “частота–дальность” при наблюдении маятника на расстояниях 2 (а), 3 (б) и 5 м (в) (маятник с металлической пластиной) от биорадиолокатора:

по вертикали — номер ячейки дальности при размере ячейки  $\delta R = 0,67$  м; по горизонтали — номер ячейки по частоте при размере ячейки  $\delta = 0,03$  Гц

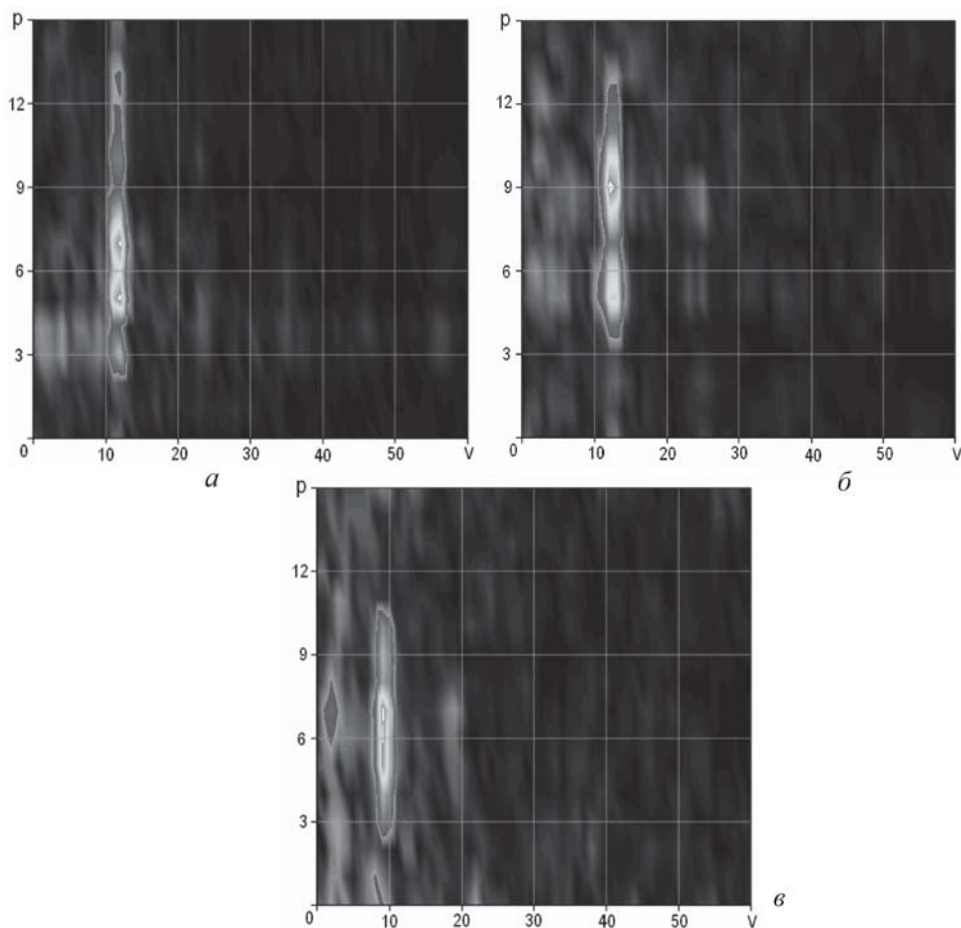
Вторая гармоника по частоте объясняется, возможно, наличием одного из трех или всей совокупностью следующих факторов: влияние физических свойств маятника, упругость подвески в двух точках и зависимость фазовой характеристики стержня от расстояния вследствие неравномерности распределения вторичного тока по стержню. На дальностях, больших дальности до цели, в данном случае наблюдаются достаточно интенсивные дополнительные максимумы. Они обязаны своим происхождением, по всей видимости, наличию переотражений.

Результат эксперимента с маятником в виде пластины, расположенным на расстоянии 5 м от радиолокатора, приведен на рис. 4, в. Положение максимума отклика в восьмом отсчете дальности соответствует расстоянию 5,33 м, что лишь на половину ширины ячейки дальности отличается от истинного среднего расстояния до колеблю-

щейся пластины. Небольшая ошибка по дальности может быть связана как с влиянием переотражений, так и с общими фазовыми ошибками приемного тракта. Характерно, что в случае маятника с грузом в виде пластины вторая гармоника колебаний на топографической диаграмме практически отсутствует, в отличие от маятника с грузом в виде стержня. Это, возможно, объясняется иным, более равномерным видом фазовой характеристики цели вследствие различий в распределении токов по поверхности пластины и стержня из-за их разных размеров и формы по сравнению с радиусом первой зоны Френеля в рассматриваемых примерах.

Диаграммы, показанные на рис. 4, *а* и *б*, характерны при появлении интерференционных отметок на дальностях, больших дальности до цели. При этом положение по дальности ближайшей отметки вполне точно соответствует истинному положению цели. На второй гармонике колебаний маятника также присутствуют интерференционные отметки на дальностях, больших дальности до маятника, и интенсивность их сравнима с интенсивностью по первой гармонике. Характерно, что в случае пластины (см. рис. 4, *в*) интерференционные отметки отсутствуют, что, по-видимому, объясняется узостью диаграммы направленности пластины в вертикальной и горизонтальной плоскостях и влиянием относительного уровня диаграммы на значение эквивалентного коэффициента отражения в зеркальных точках пола, потолка и стен.

Результаты экспериментов по обнаружению дышащего человека представлены на рис. 5, *а*, *б*, *в* для дальностей до человека 2, 3 и 4 м соответственно. На рис. 5, *а* первый максимум сигнальной функции расположен на дальности 2,14 м, мало отличающейся от истинной. Наличие протяженной по дальности области интенсивных отражений может быть объяснено интерференцией за счет переотражений от местных предметов через дышащего человека. Начало интерференционного гребня примерно на 3-й ячейке дальности соответствует истинной дальности до цели, максимумы вблизи 5 и 7-й ячеек можно объяснить переотражениями от задней стены и других плоскостей комнаты, а также от местных предметов в помещении. Особенность отражений от задней стены заключается в том, что человек переотражает их по принципу радиолокации на просвет, т.е. из-за образования на силуэте человека весьма интенсивной теневой компоненты рассеянного поля [6], которая и приводит к большой высоте сигнального максимума на увеличенной дальности хода, превосходящего прямое отражение от грудной клетки. Аналогично можно объяснить и рис. 5, *б* и *в*.



**Рис. 5. Топографическая диаграмма “частота–дальность” при наблюдении дышащего человека на расстоянии 2 (а), 3 (б) и 4 м (в) от биорадиолокатора:** по вертикали — номер ячейки дальности при размере ячейки  $\delta R = 0,67$  м; по горизонтали — номер ячейки по частоте при размере ячейки  $\delta = 0,03$  Гц

Следует также отметить, что во всей серии экспериментов по обнаружению дыхания вторая гармоника дыхания выражена очень слабо, или вообще не заметна. Это сближает результаты экспериментов по наблюдению человека и результаты эксперимента с маятником в виде прямоугольной пластины. Измеренные частоты дыхания несколько изменяются от эксперимента к эксперименту и лежат в интервале от 0,27 до 0,37 Гц, что обусловлено возможной вариабельностью ритма дыхания человека. На диаграммах (см. рис. 5) в данных экспериментах практически не удастся обнаружить компоненту сердцебиения, что объясняется широкой диаграммой направленности антенны радиолокатора, существенно перекрывающей область гортани, в которой колебания пульса имеют наибольшую амплитуду по сравнению с другими частями облучаемой локатором поверхности тела.

В целом проведенные лабораторные эксперименты на созданном макете прототипа биорадиолокатора подтвердили его работоспособность и правильность выбранных технических решений в части режекции интенсивных отражений от неподвижных местных предметов. Качественно подтвержден также установленный с помощью математического моделирования факт регистрации и влияния на сигнальную функцию в плоскости “частота–дальность” интерференционных преотражений от местных предметов и поверхностей в помещении через подвижные объекты (маятник, дышащий человек). Простейшей мерой борьбы с такими переотражениями является расширение полосы частот СЧМ зондирующего сигнала вплоть до появления разрешения интерференционных путей по дальности и применение логического выделения ближайшей отметки по дальности на обнаруженной частоте дыхания.

**Заключение.** С помощью математического моделирования работы степ-ЧМ радиолокатора малой дальности внутри помещений оценено влияние интерференции из-за отражений от поверхностей пола, потолка и стен. Получено, что для расстояний от РЛС до объекта от 2 до 4 м сигналы переотражений от зеркальных точек поверхностей через цель, имеющую характерные периодические колебания в ритме дыхания и сердцебиения, не режектируются традиционной системой селекции подвижных целей и проявляются на частотах дыхания и сердцебиения на дальностях, больших дальности “РЛС–цель”. Интерференция при небольшой полосе СЧМ сигнала в 150...250 МГц может приводить к смещению отметки цели по дальности, ее расширению, а при определенных условиях к дроблению отметки с появлением провала на истинной дальности до цели. С увеличением полосы частот СЧМ сигнала до значений порядка 0,8...1,0 ГГц, обеспечивающих разрешение по задержке прямых сигналов от цели и переотраженных целью сигналов зеркальных точек, достигается их полное разделение по дальности, при этом истинная отметка цели является ближайшей.

Наличие эффекта интерференции из-за переотражения сигналов зеркальными точками и местными предметами через подвижную цель при работе радиолокаторов малой дальности с одноканальными передающей и приемной антеннами внутри помещений требует учета этого явления и выбора увеличенной полосы частот СЧМ зондирующего сигнала и последующего применения алгоритмических или иных методов режекции переотраженных сигналов. Для пространственно многоканальных передающей и приемной антенных систем также необходим учет этих явлений в интересах последующей разработки адаптивной системы компенсации интерференционных сигналов.

На базе созданного макета прототипа степ-ЧМ радиолокатора с высокими характеристиками разрешающей способности  $\delta R = 0,67$  м и однозначного интервала  $R_{\max} = 10$  м по дальности проведены две

серии лабораторных экспериментов: по обнаружению искусственных целей в виде колеблющихся маятников с грузом в виде металлического стержня и металлической пластины; по обнаружению дышащего человека. Эксперименты проводились при различных дальностях от цели до биорадиолокатора. В целом подтвердился теоретический вывод о наличии дополнительных интерференционных отметок на частотах колебания целей, располагаемых на дальностях, больших дальности до цели.

В экспериментах по обнаружению маятников на диаграммах “частота–дальность” имели место интерференционные отметки на дальностях, всегда больших дальности до цели. При этом положение по дальности ближайшей отметки вполне точно соответствовало истинному положению цели. В ряде случаев отметки не разрешаются по дальности и интерферируют, в результате чего может иметь место небольшое смещение дальности истинной отметки. В экспериментах с маятником и грузом в виде стержня наблюдалась достаточно интенсивная вторая гармоника частоты колебаний маятника, практически отсутствовавшая, когда грузом маятника являлась металлическая пластина.

В экспериментах по обнаружению дышащего человека также имеет место интерференционный гребень отметок, начало которого всегда соответствует истинной дальности до цели. Максимумы на больших дальностях объясняются переотражениями через человека от задней стены и от других плоскостей комнаты, а также от местных предметов. Особенность отражений от задней стены заключается в том, что человек переотражает сигнал по принципу радиолокации на просвет, т.е. за счет образования на силуэте человека весьма интенсивной теневой компоненты рассеянного поля, которая приводит к большой величине сигнального максимума на увеличенной дальности, в ряде случаев превосходящего прямое отражение от грудной клетки. В данных экспериментах вторая гармоника дыхания не наблюдалась и практически не удалось обнаружить компоненту сердцебиения.

В целом проведенные лабораторные эксперименты на созданном макете упрощенного прототипа степ-ЧМ радиолокатора подтвердили его работоспособность и правильность выбранных технических решений в части аппаратной режекции интенсивных отражений от неподвижных местных предметов. Качественно подтвержден установленный с помощью математического моделирования факт наличия и влияния на сигнальную функцию в плоскости “частота–дальность” интерференционных преотражений от местных предметов и поверхностей в помещении через подвижные объекты (маятник, дышащий человек). Простейшей мерой борьбы с такими переотражениями является расширение полосы частот ЗС вплоть до появления разрешения интерференционных путей по дальности и применение логического

выделения ближайшей отметки по дальности на обнаруженной частоте дыхания. Возможны и другие подходы к компенсации интерференционных переотражений, например, на основе адаптации в частотно-многоканальных и пространственно-многоканальных системах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wehner D. R. High Resolution Radar. Artech House, 1987.
2. Ultra-Wideband Radar Technology. Edited by James D. Taylor. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 2000.
3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972.
4. Bugaev A. S., Chapursky V. V., Ivashov S. I. Mathematical simulation of remote detection of human breathing and heartbeat by multifrequency radar on the background of local objects reflections // Record of 2005 IEEE International Radar Conference, May 9–12, 2005. Arlington, Virginia, USA.
5. Бугаев А. С., Васильев И. А., Ивашов С. И., Чапурский В. В. Радиолокационные методы выделения сигналов дыхания и сердцебиения // Радиотехника и электроника. – 2006. – № 10. – С. 1224–1239.
6. Уфимцев П. Я. Черные тела и теневое излучение // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34. – № 2. – С. 2519–2527.

Статья поступила в редакцию 12.03.2007



Игорь Александрович Васильев родился в 1949 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1977 г. Канд. техн. наук. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. Ведущий научный сотрудник лаборатории дистанционного зондирования НИИПММ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области радиоэлектроники.

I.A. Vasiliev (b. 1949) graduated from the Moscow Institute for Power Engineering in 1973 and the Lomonosov Moscow State University in 1977. Ph. D. (Eng.), Winner of Prize of RF

Government in Science and Technology, leading researcher of laboratory for remote sounding of research institute of Applied Mathematics and Mechanics of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of radio-electronics.



Сергей Иванович Ивашов родился в 1947 г., окончил Московский физико-технический институт. Канд. техн. наук, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. Заведующий лабораторией НИИПММ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных публикаций в области дистанционного зондирования, подповерхностной радиолокация, обработки изображений и распознавания образов, аппаратуры для гуманитарного разминирования.

S.I. Ivashov (b. 1947) graduated from the Moscow Institute for Physics and Technology. Ph. D. (Eng.), Winner of Prize of RF

Government in Science and Technology, head of laboratory of research institute of Applied Mathematics and Mechanics of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of remote sounding, undersurface radiolocation, picture processing and image identification, apparatus for unmanned mine clearing.



Валерий Викторович Чапурский родился в 1942 г., окончил Московский энергетический институт в 1965 г. Д-р техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИИПММ МГТУ им. Н.Э. Баумана, “Почетный радист России”. Автор более 80 работ публикаций и изобретений в области радиолокации и радиоэлектронных систем.



V.V. Chapurskiy (b. 1942) graduated from the Moscow Institute for Power Engineering in 1965. D. Sc. (Eng.), senior researcher, chief researcher of research institute of Applied Mathematics and Mechanics of the Bauman Moscow State Technical University. Honored Radio Operator of Russia. Author of more than 80 publications and inventions in the field of radiolocation and radio-electronic systems.

## **ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”**

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

**Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.**

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год.

В серии “Приборостроение” (главный редактор серии — д-р техн. наук профессор В.А. Матвеев) публикуются материалы по следующим основным направлениям: информатика и вычислительная техника; системы управления; лазерные и оптико-электронные системы; оптика; радиоэлектроника; навигационно-гироскопические системы; мехатроника и робототехника; биомедицинские технологии; конструирование и технология приборостроения.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

**Подписывайтесь и публикуйтесь!**

**Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”**

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Тел.: (495) 263-62-60; 263-60-45.

Факс: (495) 265-42-98; 263-67-07.

E-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)