

УДК 621.396.96

## РАЗРУШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИМИТИРУЮЩИХ ПОМЕХ ПУТЕМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА

С.Р. ГЕЙСТЕР, И.С. САДОВСКИЙ

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие "СКБ Камертон",  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 17 ноября 2004

Описывается новый способ защиты радиолокационных систем от имитирующих помех, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. Этот способ заключается в разрушении временной междупериодной когерентности и соответственно спектральной структуры имитирующих помех в результате псевдослучайного изменения структуры фазовой диаграммы направленности антенны путем управления фазовым распределением на раскрыве антенны. Работоспособность способа защиты подтверждается результатами математического моделирования.

*Ключевые слова:* имитирующая помеха, диаграмма направленности антенны, помехозащита.

### Введение

Проблема защиты от имитирующих помех (ИП) является крайне актуальной, так как именно эти помехи приводят к наиболее существенному нарушению функционирования радиолокационных систем (РЛС). Такие помехи могут быть сформированы по главному и боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС. В результате воздействия на обнаружитель многократных имитирующих помех (МКИП) в РЛС на различных дальностях обнаруживаются реально не существующие (ложные) объекты, которые могут быть расположены перед реальным объектом (передние МКИП) или за ним (задние МКИП). В [1, 2] на примере импульсного зондирующего сигнала (ЗС) со случайной междупериодной структурой показано, что сочетание спектрального анализа и случайного изменения начальных фаз ЗС позволяет разрушить передние имитирующие помехи.

### Общая характеристика подхода к изменению междупериодной структуры имитирующих помех, принимаемых по боковым лепесткам ДНА, путем управления параметрами антенны РЛС

Антенна РЛС является пространственным фильтром с пространственной амплитудно-фазо-частотной характеристикой, которая описывается диаграммой направленности:  
на передачу

$$F_{a\_t}(\theta, \theta_{\perp}) = |F_a(\theta, \theta_{\perp})| \exp(i \arg F_a(\theta, \theta_{\perp})) = F_M(\theta, \theta_{\perp}) \exp(i F_{\phi}(\theta, \theta_{\perp})), \quad (1a)$$

на прием

$$F_{a\_r}(\theta, \theta_{\perp}) = |F_a(\theta, \theta_{\perp})| \exp(-i \arg F_a(\theta, \theta_{\perp})) = F_M(\theta, \theta_{\perp}) \exp(-i F_{\phi}(\theta, \theta_{\perp})), \quad (1б)$$

где  $F_M(\theta, \theta_\perp) = |F_a(\theta, \theta_\perp)|$  — амплитудная нормированная ДНА;  $F_\phi(\theta, \theta_\perp) = \arg F_a(\theta, \theta_\perp)$  — фазовая ДНА;  $\theta, \theta_\perp$  — угол места и азимут точки наблюдения относительно электрической оси антенны РЛС.

Известно [3], что для фазированной антенной решетки (ФАР) с симметричным относительно центра амплитудным и линейным фазовым распределениями фазы сигналов, излучаемых в соседних лепестках ДНА, отличаются на  $\pi$ , т.е.  $F_\phi(\theta, \theta_\perp) = \arg F_a(\theta, \theta_\perp) = \phi_0 \pm n\pi$ , где  $n$  — целое число.

Система радиоэлектронного подавления (РЭП) для формирования ИП по боковым лепесткам ДНА использует ЗС, имеющий в типовом случае когерентную междупериодную структуру. Для защиты РЛС от ИП можно использовать *псевдослучайный характер междупериодной структуры ЗС по боковым лепесткам ДНА*, который можно создать путем междупериодного управления во времени в первую очередь фазовым распределением (ФР)  $\varphi_a(x, y)$  на раскрыве антенны РЛС:

$$\varphi_a(x, y, t) = \varphi_0(x, y) + \varphi_d(x, y, t), \quad (2)$$

где  $\varphi_0(x, y)$  и  $\varphi_d(x, y, t)$  — основное линейное ФР, определяющее положение главного лепестка ДНА в пространстве, и дополнительное ФР, влияющее на структуру боковых лепестков ДНА.

Основным требованием к дополнительному ФР является при минимальном влиянии на  $F_a(\theta, \theta_\perp)$  в области главного лепестка ДНА обеспечение изменения (перемещение или вращение относительно главного лепестка ДНА) во времени боковых лепестков  $F_a^b(\theta, \theta_\perp, t)$  ДНА:

$$F_a^b(\theta, \theta_\perp, t) = F_M^b(\theta, \theta_\perp, t) \exp(iF_\phi^b(\theta, \theta_\perp, t)). \quad (3)$$

### Математическая модель временной структуры многократной имитирующей помехи при управлении фазовым распределением на раскрыве антенны РЛС

Сигналы МКИП, принятые РЛС *по главному лепестку ДНА* (угол места  $\varepsilon_t$  и азимут  $\beta_t$  системы РЭП соответствуют углу места  $\varepsilon_R$  и азимуту  $\beta_R$  максимума главного лепестка ДНА), описываются выражением

$$\mathfrak{S}_g^G(t) = E_{I_g}(t) U_L(t - t_{I_g}) \exp[i\{(\omega_0 + \Omega_{ds})t + \varphi_{I_g}(t)\}], \quad (4)$$

где  $E_{I_g}(t)$ ,  $\varphi_{I_g}(t)$  — законы изменения амплитуды и начальной фазы  $g$ -й МКИП;  $U_0(t)$ ,  $U_L(t) = \sum_{l=1}^L U_0(t - (l-1)T_r)$  — комплексные законы модуляции одиночного ЗС и пачки из  $L$  одиночных ЗС;  $T_r$  — период повторения ЗС;  $t_{I_g} = (2r_t/c + \Delta t_g)$  — задержка  $g$ -й МКИП, включающая удвоенное время прохождения ЗС к объекту на радиальной дальности  $r_t$ , а также задержку  $\Delta t_g$  в ретрансляторе  $g$ -й МКИП, имитирующую сдвиг МКИП по дальности на величину  $\Delta r_g = \Delta t_g c / 2$ ;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  — круговая средняя несущая частота ЗС;  $\Omega_{ds} = 4\pi V_r / \lambda$  — доплеровская частота МКИП за счет передвижения системы РЭП с радиальной скоростью  $V_r$  относительно РЛС;  $\lambda$  — длина волны.

Сигналы МКИП той же системы РЭП, принятые РЛС по боковому лепестку ДНА при неизменных параметрах антенны, с учетом (1а) и (1б) описываются выражением

$$\mathfrak{S}_g^B(t) = E_{I_g}^B(t) U_L(t - t_{I_g}) \exp[i\{(\omega_0 + \Omega_{ds})t + \varphi_{I_g}(t)\}], \quad (5)$$

где  $E_{I_g}^B(t) = E_{I_g}(t)K_V(t)(F_M^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R}))^2$  — закон изменения амплитуды  $g$ -й МКИП, учитывающий амплитудную ДНА;  $\theta^{t-R} = (\varepsilon_t - \varepsilon_R)$ ,  $\theta_{\perp}^{t-R} = (\beta_t - \beta_R)$  — угловые отклонения носителя системы РЭП от электрической оси антенны;  $K_V(t)$  — коэффициент дополнительного усиления в тракте системы РЭП. Далее будем полагать, что  $\varphi_{I_g}(t) = \text{const} = \varphi_{I_g}$  и  $K_V(t) = \text{const}$  в течение времени наблюдения.

Явление изменения фазы в боковых лепестках ДНА можно использовать для разрушения междупериодной когерентности ИП путем введения специального междупериодного управления фазовой ДНА. При этом целесообразно управлять не амплитудным распределением, а фазовым распределением на раскрыве антенны. Предлагаемый способ защиты РЛС от ИП по боковым лепесткам ДНА заключается в последовательном выполнении следующих операций: во-первых, на передачу устанавливается основное ФР  $\varphi_{a_0}(x, y)$ , а после излучения ЗС (или после определенной дальности, например, зоны мешающих отражений от поверхности) устанавливается одно из (разное в каждом периоде) дополнительных ФР  $\varphi_{a_l}(x, y), l = \overline{1, L}$ , на прием, при котором изменяется амплитудно-фазовая структура боковых лепестков ДНА; во-вторых, когерентное накопление принятых сигналов в  $L$  периодах зондирования; в-третьих, обнаружение объектов и анализ спектра сигнала для каждой обнаруженной отметки с принятием решения о ее принадлежности к реальному объекту или к ИП.

С учетом междупериодного управления фазовым распределением выражение (5) для имитирующей помехи, принятой по боковым лепесткам ДНА, преобразуется к виду

$$\mathfrak{S}_g^B(t) = \sum_{l=1}^L E_{I_g}^B(t - t_{I_g} - (l-1)T_r) \exp(i\Delta\phi_l) U_0(t - t_{I_g} - (l-1)T_r) \exp[i\{(\omega_0 + \Omega_{ds})t + \varphi_{I_g}\}], \quad (6)$$

где  $E_{I_g}^B(t - (l-1)T_r - t_{I_g}) = E_{I_g}(t)K_V(t)F_{M_0}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})F_{M_l}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})$  — закон изменения амплитуды  $g$ -й МКИП, учитывающий амплитудные ДНА на передачу  $F_{M_0}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})$  и прием  $F_{M_l}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})$ ;  $\Delta\phi_l = \{F_{\phi_0}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R}) - F_{\phi_l}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})\}, l = \overline{1, L}$  — дополнительный фазовый сдвиг при излучении ЗС с основным ФР, обеспечивающим фазу  $F_{\phi_0}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})$ , и приеме с  $l$ -м дополнительным ФР, обеспечивающим фазу  $F_{\phi_l}^b(\theta^{t-R}, \theta_{\perp}^{t-R})$ .

Фазовые сдвиги  $\Delta\phi_l, l = \overline{1, L}$ , ИП для неизвестного углового направления на постановщик от периода к периоду зондирования будут случайным образом принимать значения в диапазоне  $\{-\pi; \pi\}$ . При этом будет происходить разрушение спектральной структуры МКИП, сформированных по боковым лепесткам ДНА как “вперед”, так и “назад”.

### Пример анализа эффективности разрушения междупериодной структуры имитирующих помех, принимаемых по боковым лепесткам ДНА РЛС

Для проверки эффективности предлагаемого способа защиты было проведено моделирование приема ИП для линейной ФАР по главному и боковому лепестку ДНА. Моделирование осуществлялось при следующих условиях: линейная ФАР из 25 излучателей имела амплитудное распределение в форме функции  $\cos(x)$ ; основное ФР на передачу — линейное (представлено на рис. 1 сплошной линией); дополнительное ФР на прием менялось случайно в каждом зондировании  $l = \overline{1, L}$  и представляло собой основное ФР, в которое симметрично относительно центра ФАР (элемент  $n = 0$ ) в элементы с номерами  $n = \pm 6, 7, \dots, 12$  вносились независимые равновероятные случайные фазовые добавки из интервала  $\{0; 0,785 \text{ рад}\}$  с дискретностью  $\pi/16$  (на рис. 1 прерывистой линией представлен один из случайных вариантов дополнительного ФР).

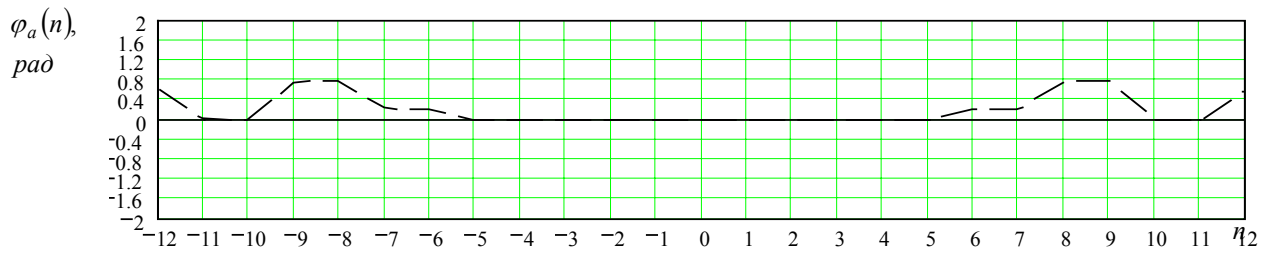


Рис. 1. Фазовые распределения по элементам ФАР в  $l$ -м периоде зондирования–приема

На рис. 2–4 для основного и одного из вариантов дополнительного амплитудно-фазовых распределений (АФР) представлены: амплитудные ДНА (рис. 2) для основного АФР на передачу  $F_{M_0}(\theta)$  (сплошная линия) и для  $l$ -го дополнительного АФР на прием  $F_{M_l}(\theta)$  (прерывистая линия) в  $l$ -м периоде зондирования; фазовые ДНА (рис. 3) для основного АФР на передачу  $F_{\phi_0}(\theta)$  (сплошная линия) и для  $l$ -го дополнительного АФР на прием  $F_{\phi_l}(\theta)$  (прерывистая линия); зависимость дополнительного фазового сдвига  $\Delta\phi_l$  (см. (6)) от угла  $\theta$  в  $l$ -м периоде ЗС (рис. 4).

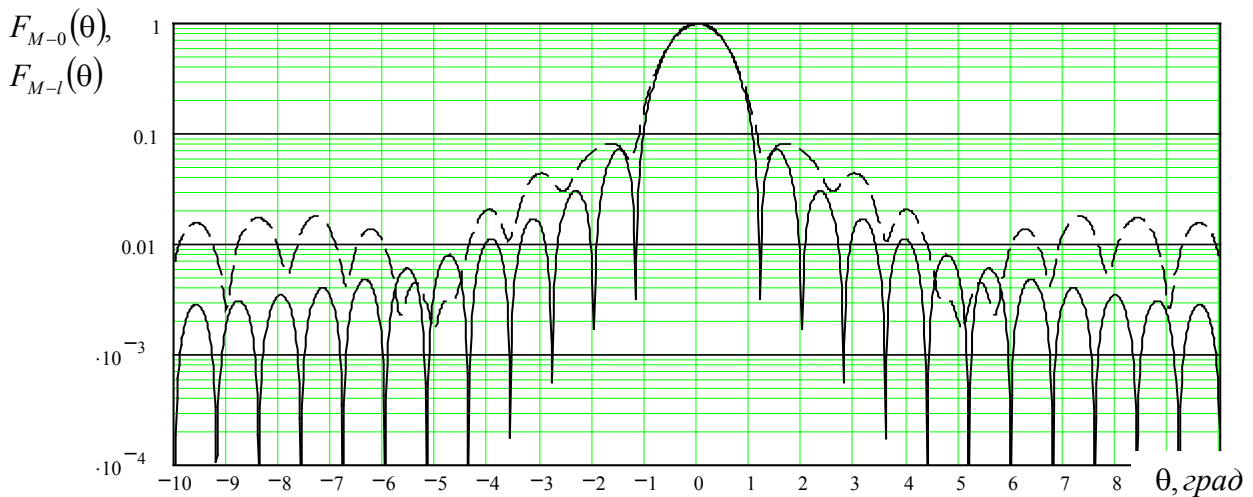


Рис. 2. Нормированные амплитудные ДНА ФАР в  $l$ -м периоде зондирования–приема

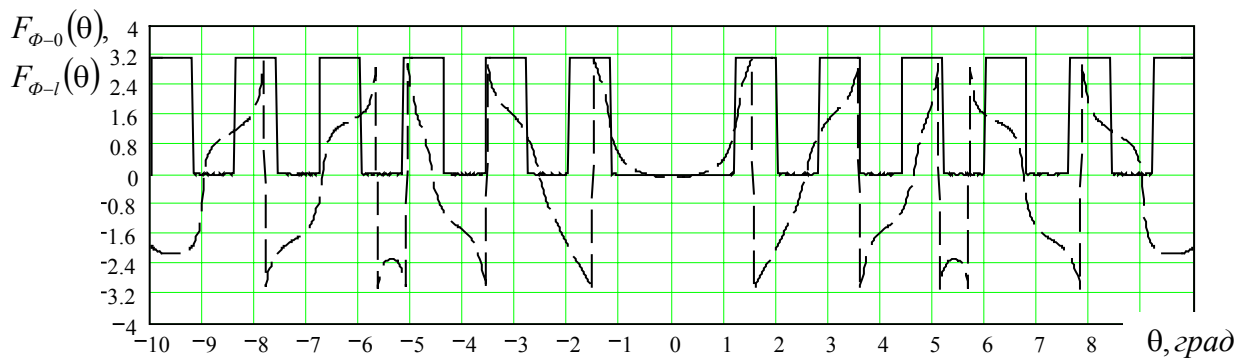


Рис. 3. Фазовые ДНА ФАР в  $l$ -м периоде зондирования–приема

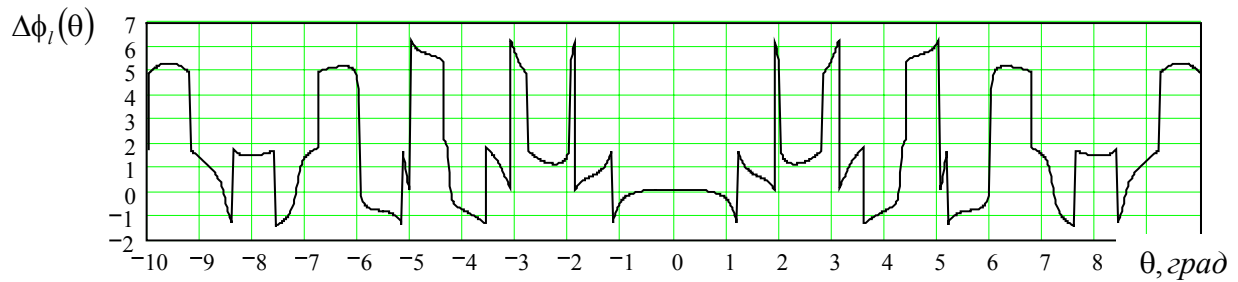


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига  $\Delta\phi_l$  от угла  $\theta$  в  $l$ -м периоде зондирования–приема

Имитирующие помехи, амплитуды которых на входе антенны составляли одну относительную единицу (о.е.), моделировались в 32 периодах зондирования для системы РЭП, находящейся в третьем боковом лепестке ДНА при  $\theta=3,25$  град. Над последовательностью ИП, принятых в 32 периодах, осуществлялось 32-точечное дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Для проведения сопоставительного анализа на рис. 5 представлены амплитуды принятых ИП на выходах 32 фильтров ДПФ для случая постоянного основного АФР на передачу и прием (см. (5)), а на рис. 6 — для случая режима защиты от ИП по боковым лепесткам (постоянного основного АФР на передачу и случайно изменяющегося фазового распределения на прием для каждого периода (см. (6))).

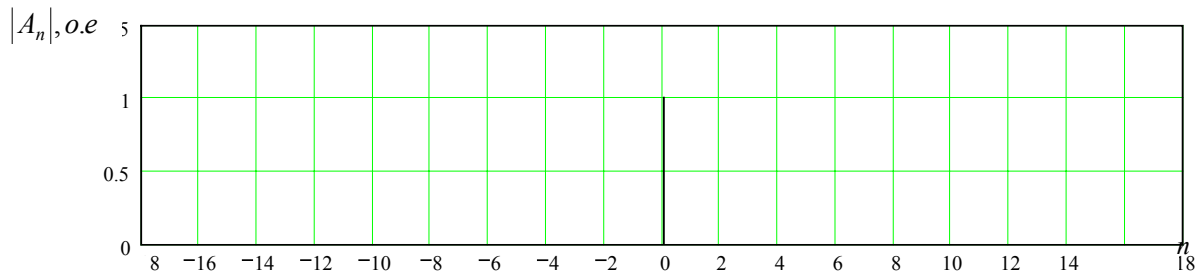


Рис. 5. Амплитуды на выходах фильтров ДПФ для постоянного ФР в ФАР на передачу и прием

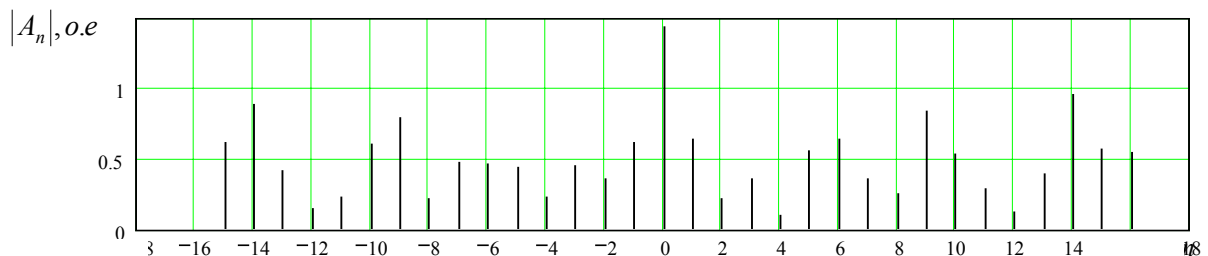


Рис. 6. Амплитуды на выходах фильтров ДПФ для случайно изменяемого ФР в ФАР на прием

### Заключение

Во-первых, имитирующая помеха, принятая по боковому лепестку ДНА, при *постоянном АФР* сохраняет междупериодную когерентность и успешно имитирует сигнал реального объекта. Во-вторых, использование предложенного способа защиты, основанного на случайном изменении фазового распределения на прием, приводит к разрушению междупериодной когерентности помехи и расширению ее спектра, что позволяет распознать и отсеleccionировать имитирующие помехи в совокупности обнаруженных отметок. При этом уровень дополнительных (паразитных) спектральных компонент сигнала реального объекта в главном лепестке имел значения менее  $(-40)$  дБ.

# **SIMULATING BARRIER SPECTRAL PATTERN DEGRADATION BY PSEUDORANDOM CHANGING THE PHASE DIRECTIONAL DIAGRAM OF THE RADAR SET ANTENNA**

S.R. GEYSTER, I.S. SADOVSKI

## **Abstract**

This abstract describes new way of protection the radar systems from simulating barriers those are received along side lobes of the antenna directional diagram. This method contains the temporal degradation of coherence between periods and simulating barrier spectral pattern degradation correspondingly by pseudorandom changing the phase directional diagram of the antenna by means of phase distribution control on the aperture. Efficiency of this method is verified by the mathematical modeling results.

## **Литература**

1. *Гейстер С.Р.* Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам. Мн., 2000.
2. *Гейстер С.Р.* // Интеллектуальные системы: Сб. науч. тр. Ин-та технической кибернетики НАН Беларуси. Вып. 2. Мн, 1999. С. 89–95.
3. Антенные системы радиоэлектронной техники / Под ред. Л.Н. Маркова. М., 1993.