

УДК 621.396.96

И.Г. Леонов<sup>1</sup>, Ю.Н. Седышев<sup>2</sup>, П.Ю. Седышев<sup>2</sup>, В.А. Тютюнник<sup>2</sup>, А.Ф. Шевченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

## СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МНОГОЧАСТОТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ С ПАРАМЕТРАМИ МОДУЛЯЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АКТИВНОЙ ФАР

Установлен качественный и количественный характер взаимосвязей структуры пространственно-временных сигналов, их корреляционных свойств с параметрами многочастотной модуляции в активной ФАР и ее характеристиками. Полученные результаты могут быть использованы при выборе зондирующих сигналов для РЛС высокой производительности.

**Ключевые слова:** пространственно-временной сигнал, многочастотная модуляция, активная ФАР.

### Общая постановка задачи

Одно из перспективных направлений в развитии теории и техники антенн СВЧ связано с исследованием, разработкой и проектированием динамических антенн (ДА) [1]. То есть излучающих систем, у которых амплитудно-фазовое распределение (АФР) полей (токов) в раскрыве, характерные размеры, последовательность включения излучателей и (или) другие параметры изменяются во времени [2]. Наиболее полно достоинства ДА для задач радиолокации позволяют реализовать активные фазированные антенные решетки (АФАР), каждый из элементов которых представляет собой отдельный тракт формирования и обработки [3]. Использование АФАР открывает беспрецедентные возможности по повышению ТТХ радиолокаторов за счет сверхбыстро или параллельного обзора пространства путем синтеза (восстановления) характеристик направленности передающих решеток по отраженным сигналам в приемном устройстве [4 – 6] и вызывает необходимость в выборе зондирующих пространственно-временных сигналов (ПВС) по совокупности требований к РЛС высокой производительности. Решение задачи выбора обычно базируется на заведомо известных выводах теории сигналов и результатах их анализа [7]. Однако специфика ПВС, в отличие от традиционных «временных» сигналов, требует установления качественных и количественных взаимосвязей между параметрами и видами модуляции, характеристиками антенной системы и пространственно-временной (частотной) структурой сигналов, их корреляционными свойствами. Так как многочастотная модуляция (МЧ) имеет ряд преимуществ при реализации в активных ФАР (по части согласования излучателей, требований к широкополосности. КПД антенны и другими) [2], то целью настоящей статьи является установление взаимосвязей между структурой, корреляционными свой-

ствами МЧ ПВС и параметрами модуляции в АФАР, ее характеристиками. Это позволит оценить потенциальные возможности таких сигналов по увеличению темпа обзора РЛС.

### Основная часть

Поскольку особенностью всего класса МЧ сигналов, состоящих из одинаковых частотных составляющих, является периодичность спектра [8], то существует возможность рассматривать МЧ ПВС как сигналы, средние частоты комплексных огибающих (КОГ) составляющих которых являются гармониками Фурье. Это позволяет ввести единые параметры для всего класса ПВС как общения МЧ сигналов на пространственный случай. С этой целью в качестве ортогональной системы выбран базис тригонометрических функций с интервалом ортогональности  $T = \Delta f^{-1}$ . Тогда функция МЧ модуляции в раскрыве передающей АФАР:

$$T_0(t) = \text{Re}\{\dot{T}_{\text{МЧ}}(t) \cdot \exp\{j \cdot (2\pi f_0 t + \varphi_0)\}\}; \quad (1)$$

$$\dot{T}_{\text{МЧ}}(t) = \sum_{n=-N}^N \dot{T}_n(t) = \sum_{n=-N}^N \dot{A}_n \cdot \exp\{j 2\pi p_n \Delta f t\}, \quad (2)$$

где  $\dot{T}_{\text{МЧ}}(t)$  – КОГ составляющих МЧ сигналов подводимых к каждому  $n$ -му из  $2N+1$  излучателей передающей АФАР;  $f_0, \varphi_0$  – несущая (средняя) частота и начальная фаза, соответственно;  $\Delta f = T^{-1} = f_0 \gamma^{-1}$  – фундаментальная частота которую с точностью до  $\gamma \gg 1$  положим пропорциональной  $f_0$ ;  $\dot{A}_n = \dot{A}(n)$ ,  $p_n = p(n)$ ,  $p_n \in (-N; N)$  – весовая функция (ВФ) и закон распределения частотных (ЧР) составляющих по элементам решетки. Выражение (1) характеризует ряд особенностей МЧ модуляции в АФАР: ВФ  $\dot{A}(n)$  – может быть в равной степени отнесена и к АФР в решетке; закон частотного ЧР  $p(n)$  может не совпадать с номером из-

лучателя, что существенно при определении пространственных (временных) фазовых набегов.

Здесь и далее будем считать ПВС, формируемый в соответствии с (1), узкополосным в пространственно-временном смысле, а свойства внутренней области антенны постоянными в полосе частот спектра сигнала [9]. Для простоты проведем анализ непрерывных когерентных МЧ ПВС в дальней зоне линейной передающей АФАР (рис. 1).

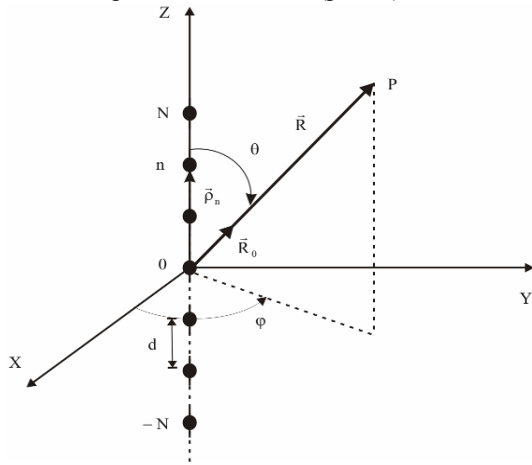


Рис. 1. Расчетная модель АФАР

**1. Анализ структуры непрерывных много-частотных ПВС и их связь с характеристиками АФАР.** Под непрерывным когерентным МЧ ПВС будем понимать комплексную огибающую поля излучения, в дальней зоне АФАР, если к каждому n-му из ее  $2N+1$  излучателей одновременно подводятся частотные составляющие с КОГ (2). При эквидистантной расстановке составляющих по элементам АФАР, когда  $p_n = n$ , частотно-временная диаграмма составляющих сигнала приведена на рис. 2.

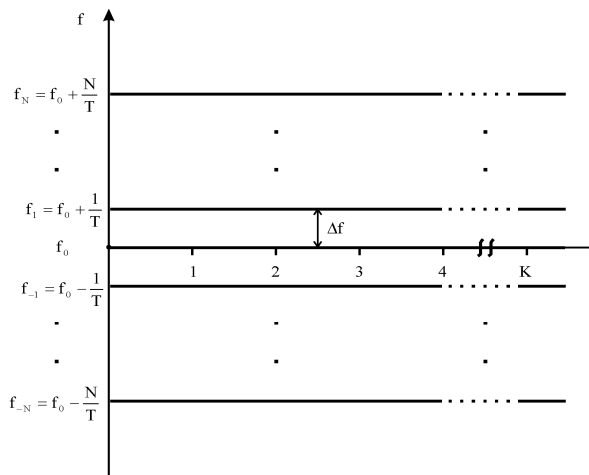


Рис. 2. Составляющие непрерывного МЧ сигнала

В соответствии с (2) ПВС формируемый линейной АФАР из идентичных, одинаково ориентированных  $2N+1$  точечных излучателей, с шагом  $d$ , на главной поляризации, с точностью до константы, пропорциональна:

$$\dot{E}(\tilde{\theta}, t') = f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \times$$

$$\times \sum_{n=-N}^N \dot{A}_n \cdot \exp\{j2\pi \cdot p_n \Delta f t'\} \cdot \exp\{j2\pi n d \lambda_0^{-1} \cos \tilde{\theta}\}, \quad (3)$$

где  $t' = t - |\tilde{R}| \cdot c^{-1} = t - \tilde{t}_3$  – время с учетом запаздывания  $\tilde{t}_3$  в точку наблюдения с радиус-вектором  $\tilde{R}$ ;  $\lambda_0 = c \cdot f_0^{-1}$  – длина волны на несущей.

ПВС (3) представляет собой результат суперпозиции излучаемых гармоник, а структура сигнала определяется видом ВФ, законом ЧР и пространственным набегом фаз, то есть параметрами АФАР. Рядом преимуществ обладает эквидистантный закон ЧР в решетке, который может быть записан в двух формах - прямой и обратной:

$$p_n = n \in (-N; N), \quad p_n = n \in (N; -N), \quad (4)$$

что соответствует нарастанию (убыванию) частоты составляющей с ростом номера элемента в решетке, и соответственно нарастанию (убыванию) относительного сдвига фазы между излучателями. Определим характер распределения ПВС на пространственно-временной плоскости в случае (4). Для произвольного момента времени  $t$  и дальности до точки наблюдения  $|\tilde{R}|$ , из (3) следует, что абсолютный максимум ПВС, при  $\dot{A}_n = A_n \geq 0$ ,

$$\max(\dot{E}(\tilde{\theta}, t')) = f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \sum_{n=-N}^N A_n,$$

будет иметь место в случае:

$$2\pi(\pm t T^{-1} \mp |\tilde{R}| \Delta \lambda^{-1} + d \lambda_0^{-1} \cos \tilde{\theta}) = \pm 2m\pi, \quad (5)$$

где  $\Delta \lambda = c \Delta f^{-1}$  – длина волны на фундаментальной частоте;  $m = 0, 1, 2, \dots$  – целые вещественные числа, а знаки в равенстве соответствуют прямому и обратному закону расстановки частот. Преобразуя (5) получим распределение максимума ПВС m-го порядка на пространственно-временной плоскости:

$$\tilde{\theta}_m(t) = \arccos \lambda_0 d^{-1} \left( m \mp t T^{-1} \pm \tilde{R} \Delta \lambda^{-1} \right). \quad (6)$$

Из анализа (6) следует, что распределение максимумов ПВС имеет периодический характер. Это обусловлено дискретностью излучающей системы и спектра (3). Периодичность максимумов ПВС во времени (дальности) определяется фундаментальным периодом  $T$ ; по угловой координате электрическим шагом АФАР –  $d \lambda_0^{-1}$ . Максимум ПВС в области видимости решетки существует при  $|\lambda_0 d^{-1} (m \mp t T^{-1} \pm \tilde{R} \Delta \lambda^{-1})| \leq 1$ . В качестве примера на рис. 3, а, б приведены зависимости  $\tilde{\theta}_m(t)$  при фиксированной дальности до точки наблюдения и  $d \lambda_0^{-1} = 0,5$ ,  $\Delta f = f_0 \cdot 10^{-4}$ , на интервале  $t' \in 1,5(-T; T)$ . Как видно из рис. 3, а, б в зависимо-

сти от закона ЧР меняется порядок подсвета (порядок прохождения максимумом ПВС координаты  $\tilde{\theta}$ ), который можно согласовать с требуемой последовательностью обзора пространства РЛС.

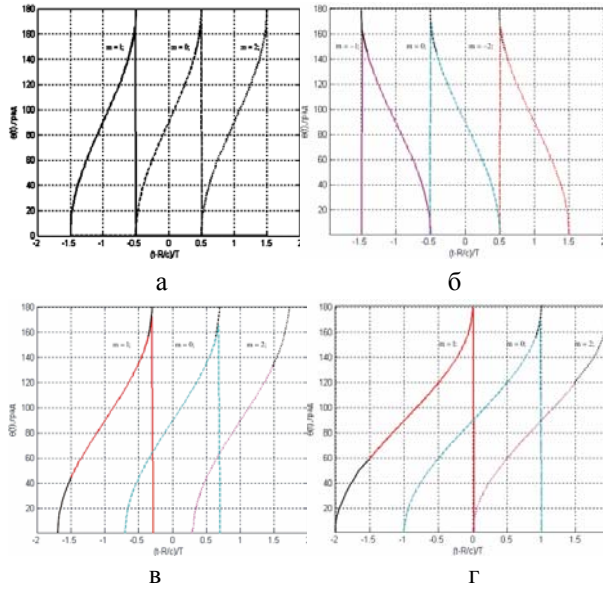


Рис. 3. Характер распределения максимумов ПВС: а –  $p_n = n$ ; б –  $p_n = -n$ ; в –  $d\lambda_0^{-1} = 0,7$ ; г –  $d\lambda_0^{-1} = 1$

Так при прямом (обратном) законе – в начальный момент времени максимум отклонен вправо (влево) от нормали к оси АР. Из анализа (3) – (6) и рис. 3 также следует, что период повторения максимумов ПВС во времени (дальности) определяется только фундаментальным периодом (частотой)  $T(\Delta f)$ . Однако период подсвета, то есть время, за которое  $m$ -й максимум ПВС проходит всю область видимости, связан также с характеристиками АФАР как:

$$T_{\text{подс}} = 2Td\lambda_0^{-1}. \quad (7)$$

Так при  $2d\lambda_0^{-1} > 1$ ,  $T_{\text{подс}} > T$ , а соседние максимумы ПВС перекрываются во времени, степень перекрытия определяется  $d\lambda_0^{-1}$ . На рис. 3, в, г приведена область существования максимумов ПВС для прямого закона ЧР, на интервале времени  $(t - |\tilde{R}|/c^{-1}) \in 1,5(-T; T)$ , при  $\Delta f = f_0 \cdot 10^{-4}$ ,  $d\lambda_0^{-1} = 0,7; 1$ . Как следует из анализа (6), (7) и рис. 3, в, г при дальнейшем увеличении шага  $d$  количество максимумов высших порядков на одном фундаментальном периоде растет. Это может затруднить однозначное определение координат. В качестве примера на рис. 4. (а) приведено нормированное модульное значение ПВС (в плоскости угол места – время) на главной поляризации поля излучения линейной эквидистантой АФАР, составленной из элементарных невзаимодействующих электрических

диполей, при излучении ее элементами составляющих непрерывного МЧ сигнала с прямым законом ЧР. Зависимости получены при  $t' \in 2(-T; T)$ ,  $\Delta f = f_0 \cdot 10^{-4}$ ,  $2N+1=11$ ,  $d = 0,5\lambda_0$ ,  $\dot{A}_n = 1$ . Как следует из анализа (3), (4) и рис. 4, а непрерывный МЧ ПВС представляет собой периодическую, бесконечную последовательность пространственных импульсов. Максимумы импульсов распределены в соответствии с (6).

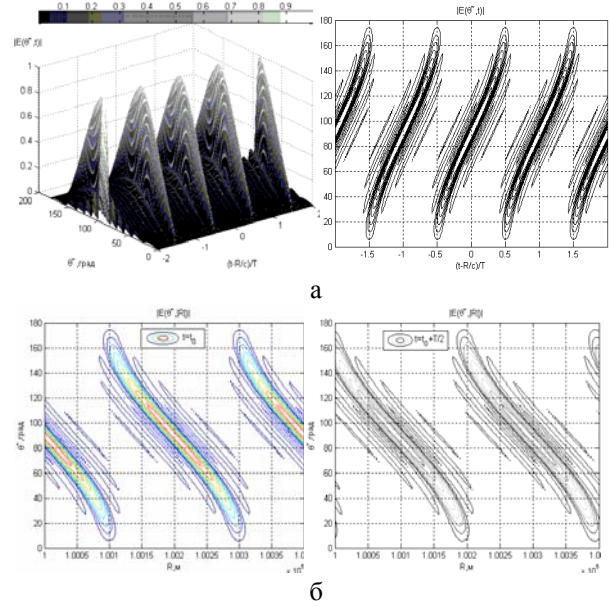


Рис. 4. К анализу пространственно-временной структуры: а – МЧ ПВС на пространственно-временной плоскости; б – к определению характера распространения МЧ ПВС

Амплитуда ПВС в плоскости  $\tilde{\theta}$  определяется ДН излучателя и представляет собой результат синфазного (когерентного) сложения непрерывных сигналов в пространстве. Характер распространения МЧ ПВС поясняет рис. 4, б, где представлено распределение МЧ ПВС (с обратным законом ЧР) в плоскости угол-дальность, для выбранных исходных данных.

Как следует из анализа рис. 4, б и (3), (6), за  $T$  максимум ПВС «проходит» расстояние в  $d\lambda$ . В моменты времени  $t' \in mT$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$  максимум ПВС ориентирован по нормали к оси АФАР, его ширина в плоскости  $\tilde{\theta}$ , (с точностью до константы  $C_{\tilde{\theta}}^{\text{век}} > 0$ , которая определяется видом ВФ) обратно пропорциональна электрическому размеру решетки:

$$2\theta^{\text{ПВС}} = C_{\tilde{\theta}}^{\text{век}} \cdot \lambda_0 L^{-1}. \quad (8)$$

Ширина максимума во времени (до  $C_t^{\text{век}} > 0$ ) обратно пропорциональна ширине спектра  $\Delta f$ :

$$2\tau^{\text{ПВС}} = C_t^{\text{век}} \Delta f^{-1} = C_t^{\text{век}} ((2N+1)\Delta f)^{-1}. \quad (9)$$

Таким образом, в пространстве происходит «сжатие» во времени МЧ сигнала, за счет синфаз-

ного сложения частотных составляющих. Это обстоятельство позволяет снять ограничение на максимальную пиковую мощность импульсных сигналов, при квазинепрерывном излучении передающей АФАР.

В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости амплитуды МЧ ПВС в его сечениях  $\tilde{t}' = mT, \tilde{\theta} \in (0; \pi)$  и  $\tilde{\theta} = 0, 5\pi, \tilde{t}' \in m(-T/2; T/2)$ .

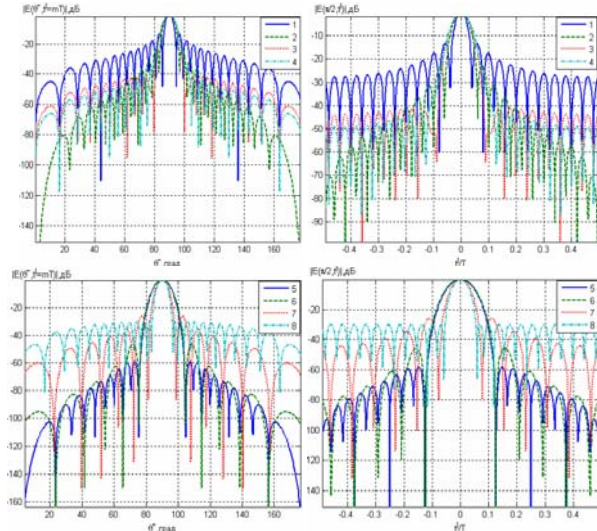


Рис. 5. Распределение амплитуды в сечениях МЧ ПВС

Расчеты проведены для выбранных выше исходных данных и  $2N + 1 = 25$ , для ряда общепринятых симметричных вещественных весовых функций [10]. В табл. 1 представлены обобщенные зависимости основных параметров МЧ ПВС (в его сечениях) от вида ВФ. Из анализа рис. 5 и табл. 1 следует, что вид весовой функции оказывает близкое по характеру влияние, как на временную, так и на угловую структуру ПВС.

Таблица 1

Зависимость параметров МЧ ПВС от вида ВФ

№ ВФ, наименование	$\tilde{t}' = mT, \tilde{\theta} \in (0; \pi)$				$\tilde{\theta} = 0, 5\pi, \tilde{t}' \in m(-T/2; T/2)$			
	$C_{\theta(0)}^{вес}$	$C_{\theta(-3дБ)}^{вес}$	$f_{max}$	$f_{med}$	$C_{t(0)}^{вес}$	$C_{t(-3дБ)}^{вес}$	$f_{max}$	$f_{med}$
1. Равномерная	2,06	0,85	13,29	30,53	2,05	0,88	13,22	26,31
2. Косинусная	3,09	1,14	23,21	46,19	3,13	1,20	23,09	41,87
3. Хемминга	4,42	1,29	41,79	51,53	4,49	1,35	41,22	46,92
4. Гаусса	6,33	1,31	43,43	55,72	6,35	1,38	43,06	50,78
5. Блэкмана	6,33	1,65	58,58	76,21	6,35	1,70	58,19	71,35
6. Бома-на	6,19	1,70	46,44	68,15	6,35	1,77	45,99	63,24
7. Треугольная	3,83	1,18	26,39	45,77	3,91	1,22	26,19	41,3
8. Дольфа-Чебышева	2,95	1,06	30,21	38,28	3,03	1,04	30	33,91

Примечания:

$$1. \quad 2\theta_{(0)}^{ПВС} [\text{рад}] = C_{\theta(0)}^{вес} / (L\lambda_0^{-1}), \quad 2\theta_{-3дБ}^{ПВС} [\text{рад}] = C_{\theta(-3дБ)}^{вес} / (L\lambda_0^{-1})$$

угловая протяженность максимума ПВС по нулям и уровню  $-3дБ$ .

$$2. \quad 2\tau_0^{ПВС} [с] = C_{t(0)}^{вес} / \Delta F, \quad 2\tau_{-3дБ}^{ПВС} = C_{t(-3дБ)}^{вес} / \Delta F$$

протяженность максимума ПВС во времени по нулям и уровню  $-3дБ$ ;

3.  $f_{max} [-дБ], f_{med} [-дБ]$  – максимальный и средний уровень боковых лепестков (БЛ) по полю.

Расчеты показали, что при количестве частотных составляющих (элементов АФАР)  $2N + 1 \geq 11 \div 15$  основные эквивалентные параметры МЧ ПВС ( $2\theta_{(0)}^{ПВС}, 2\tau_0^{ПВС}, f_{max}, f_{med}$  и другие) слабо зависят от  $N$ .

Установлено, что за время  $t_0$  равно:

$$t_0 = 2d(\lambda_0 \Delta F)^{-1}, \quad (10)$$

максимум ПВС по углу  $\tilde{\theta}$  перемещается на свою ширину (по уровню  $-3дБ$ ). Таким образом, за период подсвета в пространстве формируется бесконечное множество мгновенных диаграмм направленности ДН, из них  $T_{подс} \cdot t_0^{-1} = 2N + 1$  – разрешаемых, что позволяет решить задачу синтеза (восстановления) характеристик направленности передающей АФАР в приемном устройстве по сигналам отраженным от целей. В качестве примера на рис. 6 приведены сечения нормированного модульного значения МЧ ПВС, построенные в дискретные моменты времени

$$t' = mT + nt_0^{-1}, \quad n \in (0; N) \text{ при } 2N + 1 = 11;$$

$$\Delta f = f_0 \cdot 10^{-4}; \quad d = 0,5\lambda_0; \quad \dot{A}(n) = 1; \quad f_0^{TR}(\tilde{\theta}) = \sin \tilde{\theta}.$$

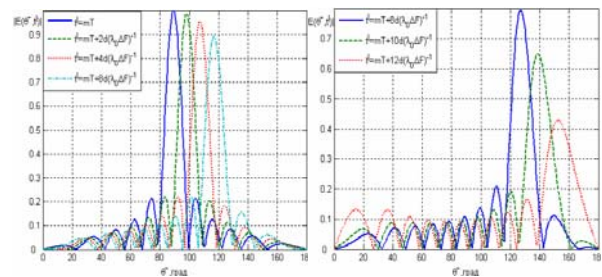


Рис. 6. К пояснению подсвета пространства МЧ ПВС

Как следует из анализа рис. 6 при отклонении максимума ПВС от нормали к АФАР его амплитуда уменьшается в соответствии с  $f_0^{TR}(\tilde{\theta})$ . Расширение и асимметрия максимума ПВС, рост уровня БЛ связаны с уменьшением эквивалентной длины АФАР. Показателем оценки указанных эффектов выберем коэффициент расширения луча (КРЛ) (главного максимума ПВС) в пространственной и временной

плоскости:

$$\text{КРЛ}_\theta(t') = \frac{2\theta^{\text{ПВС}}(t')}{2\theta^{\text{ПВС}}(mT)}; \text{КРЛ}_t(\tilde{\theta}) = \frac{2\tau^{\text{ПВС}}(\tilde{\theta})}{2\tau^{\text{ПВС}}(\pi/2)}. \quad (11)$$

На рис. 7 приведены зависимости  $\text{КРЛ}_\theta(t')$ ,  $\text{КРЛ}_t(\tilde{\theta})$  и уровня максимального  $f_{\text{max}}(t')$ ,  $f_{\text{max}}(\tilde{\theta})$  БЛ в угломестной и временной плоскости, соответственно. В расчетах принято  $2N+1=25$ ;  $\Delta f = f_0 10^{-4}$ ,  $d = 0,5\lambda_0$ , на интервале  $\tilde{\theta} \in (0, 5\pi; \pi)$ ,  $t' \in (0; T)$ .

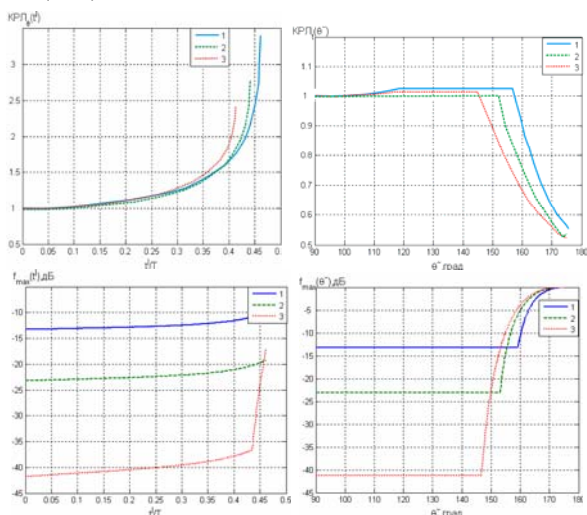


Рис. 7. Зависимости характеристик МЧ ПВС от пространственного и временного положения максимума

Из анализа рис. 7 и (3) следует, что максимум ПВС при отклонении от нормали расширяется тем быстрее, чем больше спадает весовая функция к краям АФАР. Так при  $t'/T = 0,35$ ,  $\text{КРЛ}_\theta(t') = 1,4$  и  $\text{КРЛ}_\theta(0,35T) = 1,5$ , для равномерной и ВФ Хемминга, соответственно. Во временной области наблюдается укорочение длительности максимума ПВС по первым нулям. Это можно трактовать как следствие изменения вида весовой функции при отклонении от нормали. При этом с ростом угла  $\tilde{\theta}$  ширина максимума ПВС во временной плоскости сокращается тем быстрее, чем больше спадает амплитуда к краям АФАР. Так при  $\tilde{\theta} = 37,5\lambda_0 L^{-1}$ ,  $\text{КРЛ}_t(\tilde{\theta}) = 1,03$  и  $\text{КРЛ}_t(\tilde{\theta}) = 0,9$ , для равномерной и ВФ Хемминга, соответственно. На границе области существования максимума ПВС во времени происходит увеличение максимального и среднего уровня БЛ. Так на интервале  $t' \in mT(0,4; 0,5)$  максимальный БЛ близок по амплитуде к главному максимуму, что может затруднить определение координат целей, при этом максимальный БЛ во временной плоскости растет с увеличением  $\tilde{\theta}$  тем быстрее, чем меньше спадает ВФ к краям решетки. Так при  $\tilde{\theta} = 37,5\lambda_0 L^{-1}$ ,  $f_{\text{max}} = -10\text{дБ}$  и  $f_{\text{max}} = -3\text{дБ}$  для равномерной и ВФ Хемминга, соответственно.

Спектр ПВС в соответствии с (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{E}^f(\tilde{\theta}, 2\pi f, \tilde{t}_3) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E}(\tilde{\theta}, t') e^{-j2\pi f t'} dt = \\ &= 2\pi f_0^{\text{TR}}(\tilde{\theta}) e^{-j2\pi f \tilde{t}_3} \sum_{n=-N}^N \dot{A}_n \exp\left\{j2\pi n \frac{d}{\lambda_0} \cos \tilde{\theta}\right\} \times \\ &\quad \times \delta[2\pi(f - p_n \Delta f)], \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\delta[2\pi(f - p_n \Delta f)] = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{j2\pi(f - p_n \Delta f)t\} dt -$$

спектр частотной составляющей – дельта функция Дирака, из-за фильтрующего свойства которой, спектр непрерывного МЧ ПВС имеет дискретный характер. В качестве примера на рис. 8, а приведен нормированный амплитудно-частотный спектр (АЧС) непрерывного МЧ ПВС на интервале  $t' \in 2(-T; T)$  и  $\tilde{\theta} \in (0; \pi)$  при прямом законе ЧР в линейной эквидистантной АФАР составленной из невзаимодействующих элементарных электрических диполей и  $\Delta f = f_0 10^{-4}$ ,  $2N+1=11$ ,  $d = 0,5\lambda_0$ ,  $\dot{A}(n) = 1$ . Анализ (12) и рис. 8, а показывает, что в качестве огибающей спектра выступает: в плоскости углов  $\tilde{\theta}$  – ДН единичного излучателя; в плоскости частот  $f$  – ВФ. Спектральные линии расположены в точках кратных  $\Delta f$ , их количество равно  $2N+1$ . На рис. 8, б представлены АЧС и ФЧС (фазо-частотные спектры) ПВС в дискретных угловых направлениях с шагом  $\tilde{\theta} = 0,5\pi \pm m2\theta_0^{\text{ПВС}}$  для выбранных выше исходных данных (при  $t' \rightarrow \infty$  АЧС вырождается в линейчатый).

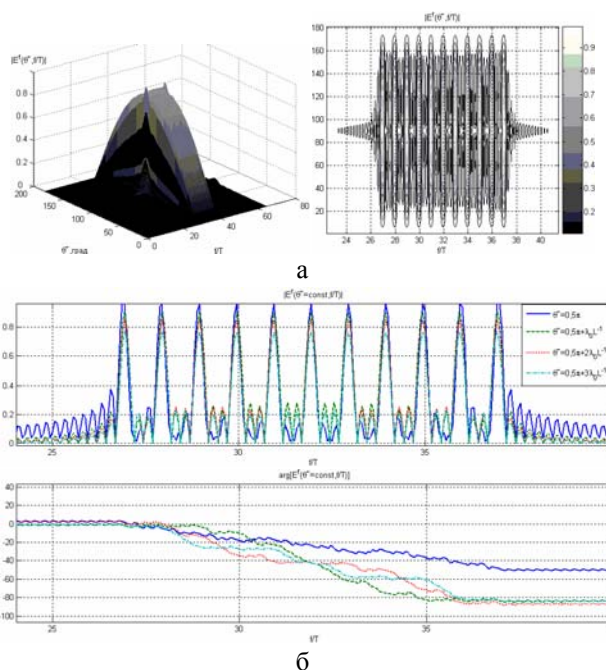


Рис. 8. К анализу пространственно-частотной структуры МЧ ПВС

Анализ рис. 8, б и (12) показывает, что при эквидистантной расстановке составляющих МЧС по элементам АФАР (4) имеет зависимость ФЧС от угла  $\tilde{\theta}$  в достаточно широком диапазоне углов близка к линейной. Указанная особенность эквидистантных законов ЧР принципиально *позволяет устранить многоканальность устройств обработки при определении угловых координат источников отраженных сигналов относительно передающей АФАР в широком секторе. Это возможно если в качестве ожидаемого углового направления (опорного сигнала) используется направление, соответствующее излучению по нормали к решетке.*

**2. Анализ корреляционных свойств непрерывных многочастотных пространственно-временных сигналов и их связь с характеристиками АФАР.** Пространственно-временную функцию рассогласования (ПВФР) непрерывного МЧ ПВС (в плоскости угол места – время запаздывания относительно передающей АФАР) запишем в виде корреляционного интеграла [11]:

$$\dot{K}(\tilde{\theta}, \theta, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E}(\tilde{\theta}, t') \cdot \dot{E}^*(\theta, t' - \tau) dt', \quad (13)$$

где  $\theta$  – ожидаемый угловое направление;  $\tau$  – параметр временного рассогласования; КОГ ожидаемого сигнала –

$$\dot{E}^*(\theta, t' - \tau) = \sum_{q=-N}^N \dot{A}_q^* \exp\{-j2\pi q d \lambda_0^{-1} \cos \theta\} \times \exp\{-j2\pi p_q \Delta f (t' - \tau)\};$$

$\dot{A}^*(q) = \dot{A}^*(n)$  и  $p(q) = p(n)$ . Подставив (3) в (13), получим:

$$\dot{K}(\tilde{\theta}, \theta, \tau) = f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \cdot \sum_{n=-N}^N \sum_{q=-N}^N \dot{A}_n \dot{A}_q^* \times \exp\left\{-j2\pi \frac{d}{\lambda_0} (q \cos \theta - n \cos \tilde{\theta})\right\} \cdot e^{j2\pi p_q \Delta f t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi (p_n - p_q) \Delta f t'} dt'. \quad (14)$$

С учетом (12), выражение для ПВФР примет вид:

$$\dot{K}(\tilde{\theta}, \theta, \tau) = f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \sum_{n=-N}^N \sum_{q=-N}^N \dot{A}_n \dot{A}_q^* \times \exp\left\{-j2\pi d \lambda_0^{-1} (q \cos \theta - n \cos \tilde{\theta})\right\} \times \exp\left\{j2\pi p_q \Delta f t\right\} \cdot \delta\left[2\pi (p_q - p_n) \Delta f\right]. \quad (15)$$

В силу фильтрующего свойства дельта функции, члены суммы (15) при  $p_q \neq p_n$  равны нулю, а ПВФР носит дискретный характер. Упростим (15) для случая эквидистантных законов ЧР (4):

$$\dot{K}(\tilde{\theta}, \theta, \tau) = f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \sum_{n=-N}^N |\dot{A}_n|^2 \times \exp\left\{-j2\pi \frac{d}{\lambda_0} n (\cos \theta - \cos \tilde{\theta})\right\} \cdot \exp\{j2\pi n \Delta f t\}. \quad (16)$$

Как видно из (16) ПВФР МЧ ПВС представляет собой результат произведения автокорреляционных функций (АКФ) многочастотного сигнала и ДН линейной антенной решетки [11]. В (16) в качестве весовой функции выступает АЧС частотных составляющих, а в качестве огибающей ПВФР в пространственной плоскости выступает ДН единичного излучателя.

Для анализа особенностей МЧ ПВС с эквидистантными законами ЧР положим в (16)  $\theta = 0, 5\pi$ , тогда абсолютный максимум ПВФР

$$\max(\dot{K}(\tilde{\theta}, \tau)) = \max\left(f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \sum_{n=-N}^N |\dot{A}_n|^2 \times \exp\left\{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} n \cos \tilde{\theta}\right\} \exp\{j2\pi \cdot n \Delta f t\}\right) = f_0^{TR}(\tilde{\theta}) \sum_{n=-N}^N |\dot{A}_n|^2,$$

в плоскости запаздываний  $\tau$  будет иметь место в случае:

$$2\pi \cdot \left(\frac{d}{\lambda_0} \cos \tilde{\theta} \pm \frac{\tau}{T}\right) = \pm 2m\pi, \quad (17)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$  – целые вещественные числа, а знаки в равенстве соответствуют прямому и обратному закону ЧР. Преобразуя (17) получим выражение, описывающее характер распределения максимума ПВФР  $m$ -го порядка на пространственно-временной плоскости:

$$\tau_m(\tilde{\theta}) = \pm T \left(\frac{d}{\lambda_0} \cos \tilde{\theta} \mp m\right). \quad (18)$$

Как следует из анализа (18) распределение максимума ПВФР в области временных запаздываний также является периодическим (с периодом  $T$ ). В качестве примера на рис. 9, а, б приведены зависимости  $\tau_m(\tilde{\theta})$  для непрерывного МЧ ПВС при  $d\lambda_0^{-1} = 0,5$ . Как следует из (18) и рис. 9, а, б в зависимости от закона ЧР меняется порядок осмотра (то есть порядок прохождения максимумом ПВФР угловой координаты), который может быть согласован с требуемой последовательностью обзора пространства РЛС. По аналогии с (7) введем понятия *периода осмотра*  $T_{осм}$ , то есть *времени, за которое  $m$ -й максимум ПВФР проходит область видимости АФАР.* Как видно из анализа рис. 9, а, б и (16), (18) величина  $T_{осм}$  *характеризует период однозначности при определении угловой координаты цели от-*

носителем передающей АР по величине времени запаздывания максимума ПВФР на выходе устройства обработки:

$$T_{осм} = T_{подсв} = 2Td\lambda_0^{-1}. \quad (19)$$

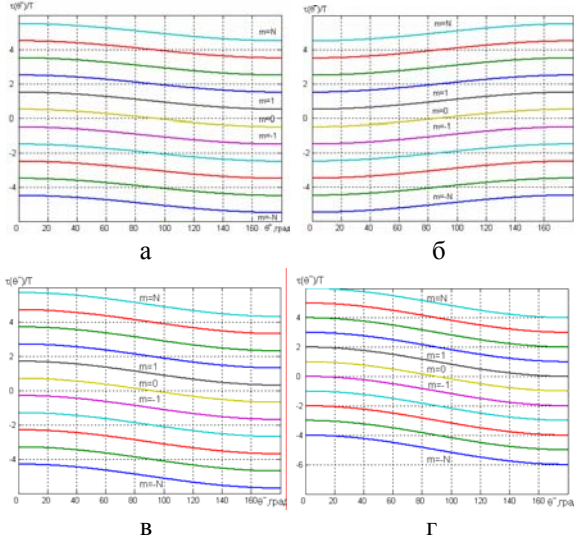


Рис. 9. Характер распределения максимумов ПВФР:

а –  $p_n = n$ ; б –  $p_n = -n$ ; в –  $d\lambda_0^{-1} = 0,7$ ; г –  $d\lambda_0^{-1} = 1$

Как следует из (19) при  $2d\lambda_0^{-1} > 1$ ,  $T_{осм} > T$ , соседние ПВФР перекрываются по времени, следовательно, сокращается период однозначного определения угловой координаты. Так при  $2d\lambda_0^{-1} > 1$ ,  $T_{осм} > T$ , соседние максимумы ПВС перекрываются во времени, степень их перекрытия определяется отношением  $d\lambda_0^{-1}$ . Сказанное подтверждает анализ рис. 9, в, г, где приведены области существования максимумов ПВФР для прямого закона ЧР при  $\Delta f = f_0 \cdot 10^{-4}$ ,  $d\lambda_0^{-1} = 0,7; 1$ . Поскольку значения  $d < 0,5\lambda_0$  в АФАР реализовать сложно, то из анализа рис. 9, 3, в, г, (7), (19) следует, что уменьшение  $T_{осм}$ , как и  $T_{подсв}$ , а в конечном счете и времени обзора пространства, целесообразно проводить путем увеличения  $\Delta f$ .

В качестве примера на рис. 10, а, б представлено нормированное модульное значение двумерной ПВФР непрерывного МЧ ПВС. Зависимости рассчитаны в соответствии с (15) для следующих исходных данных:  $\theta = 0,5\pi$ ,  $f_0^{TR}(\tilde{\theta}) = \sin(\tilde{\theta})$ ,  $\Delta f = f_0 10^{-4}$ ,  $2N+1=11$ ,  $d = 0,5\lambda_0$ ,  $\dot{A}(n)=1$ . Как следует из анализа (15) и рис. 10, а, б непрерывный МЧ ПВС имеет многопиковую структуру ПВФР. Максимумы расположены в виде гряд, наклоненных относительно оси  $\tau$ , количество последних бесконечно (на рисунке их  $2N+1$ ). Число максимумов ПВФР, положение последних в области временных запаздываний зависит от углового положения цели

$\tilde{\theta}$  и описывается (18,19). Ширина максимума ПВФР (в плоскости  $\tau$ ) при  $\theta = \tilde{\theta}$  может быть определена как:

$$2\tau^{пвфр} = C_{\tau}^{вес} \Delta F^{-1}. \quad (20)$$

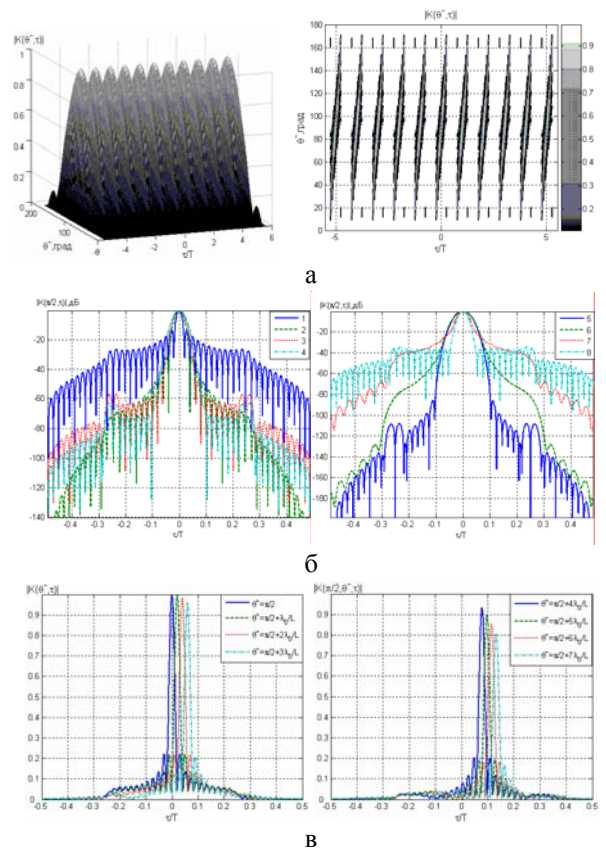


Рис. 10. К анализу ПВФР непрерывного МЧ ПВС:

- а – общий вид ПВФР непрерывного МЧ ПВС;
- б – ПВФР непрерывного МЧ ПВС при  $\tilde{\theta} = \theta$  и различных весовых функциях;
- в – ПВФР непрерывного МЧ ПВС на периоде однозначности при различных  $\tilde{\theta}$

На рис. 10, б представлены максимумы ПВФР при

$$\theta = \tilde{\theta} = 0,5\pi, \tau = nT, n \in (-N; N), f_0^{TR}(\tilde{\theta}) = \sin(\tilde{\theta}),$$

$$\Delta f = f_0 10^{-4}, d = 0,5\lambda_0, 2N+1 = 25,$$

рассчитанные для различных ВФ. В табл. 2. приведены обобщенные параметры МЧ ПВС при  $\tilde{\theta} = 0,5\pi$  ( $\tau = nT, n \in (-N; N)$ ).

Как следует из анализа рис. 10, б, (5); табл. 1, 2; (16) максимум ПВФР близок по форме к максимуму МЧ ПВС при  $\tilde{\theta} = 0,5\pi$ , лишь для равномерной весовой функции. Это объясняется тем, что в (16) ВФ входит в виде множителя  $|\dot{A}_n|^2$ . Как видно из табл. 2 для ВФ отличных от равномерной, ширина максимума ПВФР по нулям существенно возрастает по сравнению с максимумом ПВС при  $\tilde{\theta} = 0,5\pi$ , уменьшается средний и максимальный уровень БЛ.

Так для ВФ Хемминга

$$2\tau_{(0)}^{ПВФР} \approx 1,42\tau_{(0)}^{ПВС}, \quad 2\tau_{(-3дБ)}^{ПВФР} \approx 1,3\tau_{(-3дБ)}^{ПВС}$$

и  $f_{max} = -31,48(23,1)дБ$ ,  $f_{med} = -58,34(41,87)дБ$  для ПВФР и ПВС соответственно.

Таблица 2

Зависимость параметров ПВФР ПВС от вида ВФ

№	$\tilde{\theta} = 0,5\pi, \tau \in m(-T/2; T/2):$			
	$C_{\tau}^{вес} = 2\tau_{(0)}^{ПВФР} \Delta F$	$C_{\tau}^{вес} = 2\tau_{(-3дБ)}^{ПВФР} \Delta F$	$f_{max}$	$f_{med}$
1.	2,15	0,88	-13,25	-31,42
2.	4,10	1,47	-31,48	-58,34
3.	6,25	1,76	-48,54	-67,61
4.	10,55	1,86	-63,07	-78,25
5.	10,55	2,35	-86,13	-111,53
6.	31,15	2,44	-128,51	-144,05
7.	20,80	1,66	-40,72	-57,22
8.	5,47	1,37	-34,24	-45,03

Примечания:

1.  $2\tau_0^{ПВФР} [с] = C_{\tau(0)}^{вес} / \Delta F$ ,  $2\tau_{-3дБ}^{ПВФР} = C_{\tau(-3дБ)}^{вес} / \Delta F$  – временная протяженность максимума ПВФР по нулям и -3дБ.

2.  $f_{max} [дБ]$ ,  $f_{med} [дБ]$  – максимальный и средний уровень БЛ ПВФР.

Рассмотрим особенности определения угловой координат целей на периоде однозначности  $T_{осм}$ , для которого справедливо:  $\tau \in n(-Td\lambda_0^{-1}; Td\lambda_0^{-1})$ ,  $n \in (-N; N)$ . В соответствии с (18,19), относительный сдвиг огибающей ПВФР в пределах  $T_{осм}$  на:

$$\tau_0 = 2d(\lambda_0 \Delta F)^{-1}, \quad (21)$$

соответствует изменению углового положения цели на ширину максимума ПВС  $2\theta^{ПВС} (mT)$ . Таким образом, на периоде однозначности формируется бесконечное множество синтезированных (восстановленных) ДН передающей АФАР из которых  $T_{осм} / \tau_0 = 2N+1$  разрешимых. Следовательно, разрешающая способность МЧ ПВС с эквидистантными законами ЧР по углу  $\tilde{\theta}$ , определяется электрическими размерами решетки и видом выбранной весовой функции. На рис. 10, в представлены максимумы ПВФР непрерывного МЧ ПВС при  $\theta = 0,5\pi, \Delta f = f_0 10^{-4}$ ,  $2N+1=25$ ,  $d = 0,5\lambda_0$ ,  $\dot{A}(n) = 1$  рассчитанные на периоде однозначности в дискретные моменты времени  $\tau$  при  $\tau = mT + n\tau_0$ ,  $n \in (0; N)$ ,  $m \in (-N; N)$ . Как следует из рис. 10, в, с приближением максимума ПВФР к границам интервала однозначности (с приближением углового положения целей к границам области видимости), его амплитуда падает в соответствии с ДН излучателя

решетки, происходит изменение структуры БЛ и ширины максимума ПВФР. Для оценки разрешающей способности МЧ ПВС по координате  $\tilde{\theta}$  (качества синтеза (восстановления) ДН передающей АФАР в приемном устройстве), по аналогии с (11), введем коэффициент расширения максимума ПВФР (коэффициент расширения луча) в области временных запаздываний  $\tau$ :

$$КРЛ_{\tau}(\tilde{\theta}) = \frac{2\tau^{ПВФР}(\tilde{\theta})}{2\tau^{ПВФР}(\tilde{\theta} = \theta)} \quad (22)$$

В качестве примера на рис. 11, а – в представлены зависимости основных параметров ПВФР МЧ ПВС на периоде однозначности, при

$$\tilde{\theta} \in (0, 5\pi; \pi); \quad f_0^{TR}(\tilde{\theta}) = \sin(\tilde{\theta}); \quad \Delta f = f_0 10^{-4};$$

$$2N+1 = 25; \quad d = 0,5\lambda_0.$$

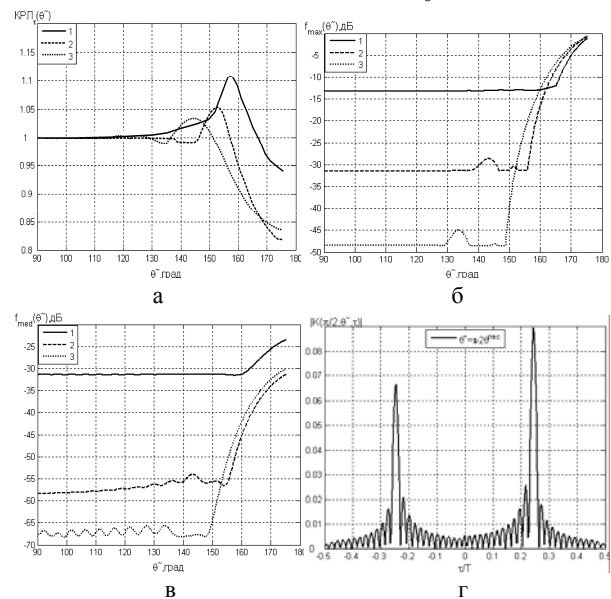


Рис. 11. Зависимости параметров ПВФР МЧ ПВС от углового положения цели

Как видно из рис. 11, с приближением углового положения цели  $\tilde{\theta}$  к границам области видимости, ширина максимума ПВФР уменьшается, а максимальный и средний уровень БЛ растет тем быстрее, чем больше спадает ВФ к краям АФАР.

Так для выбранных исходных данных граничное значение  $\tilde{\theta}$ , при котором ширина ПВФР (по нулям) близка к ширине максимума при  $\tilde{\theta} = \theta$ , соответствует значениям  $\tilde{\theta} \approx \pi - 1,53 \cdot 2\theta_0^{ПВС}$  и  $\tilde{\theta} = \pi - 1,47 \cdot 2\theta_0^{ПВС}$  для равномерной и ВФ Хемминга, соответственно. В качестве примера на рис. 11 (г) представлена зависимость ПВФР при выбранных выше исходных данных и  $\dot{A}(n) = 1$ ,  $\tilde{\theta} = \pi - 2\theta_0^{ПВС}$ . Как следует из анализа рис. 11, для угловых направлений близких к «скользящим» (по отношению к оси АФАР) уровень максимального БЛ близок к



главному лепестку, как по амплитуде, так и по временной протяженности. Это усложняет определение угловых координат целей на периоде однозначности. Так граничное значение  $\tilde{\theta}$ , при котором уровень максимального БЛ ПВФР приблизительно равен максимальному БЛ при  $\tilde{\theta} = \theta$ , составляет: для равномерной ВФ  $\tilde{\theta} \approx \pi - 1,53 \cdot 2\theta_0^{\text{ПВС}}$  и  $\tilde{\theta} = \pi - 1,47 \cdot 2\theta_0^{\text{ПВС}}$  для ВФ Хемминга соответственно.

### Выводы

1. За счет эффекта «сжатия» частотных составляющих в пространстве многочастотные ПВС позволяют ослабить ограничение на максимальную пиковую мощность импульсных сигналов при квазинерпрерывном излучении активной ФАР;

2. Использование эквидистантных законов частотного распределения позволяет избежать многоканальности стандартных устройств обработки при определении угловых координат целей в широком секторе за счет использования в качестве ожидаемого (директивного) направления (опорного сигнала) соответствующего излучению по нормали к оси передающей АФАР и синтеза (восстановления) ее характеристик направленности в приемном устройстве по отраженным сигналам. Это лежит в основе автоматического отождествления результатов измерений и обзора пространства адаптивного к целевой обстановке.

3. Установленный качественный и количественный характер взаимосвязей структуры ПВС, их корреляционных свойств с параметрами многочастотной модуляции в АФАР и ее характеристиками может быть использован при выборе сигналов для РЛС высокой производительности.

### Список литературы

1. Воскресенский Д.И. Антенны с обработкой сигнала. – М. Сайнс-пресс, 2002. – 80 с.

2. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.

3. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.

4. Davies D.E.N. Radar systems with electronic sector scanning // J. Br. Inst. Radio Ing.. – 1959. – Vol. 18. – P. 709-713.

5. Драбович, Обри, Боннасье. Сжатие диаграммы направленности антенной решетки методом пространственно-временного кодирования // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 3. – С. 18-30.

6. Замятин В.И., Толокнеев Э.А., Батулин О.В. Пространственно-временная модуляция сигналов в кольцевых антенных решетках радиолокационных станций параллельного обзора (общие соотношения) // Вестник ХГПУ. – 2000. – № 127. – С. 25-30.

7. Рихачек. Упрощенный способ выбора радиолокационных сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1973. – № 2. – С. 20-37.

8. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов. – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.

9. Коростылев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.

10. Хэррис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭРЭ. – 1980. – Вып. 66, № 1. – С. 6-96.

11. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: Справочник / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, Д.И. Леховицкий, С.П. Леценко и др.; Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

Поступила в редколлегию 15.07.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Ермаков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОЧАСТОТНИХ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СИГНАЛІВ З ПАРАМЕТРАМИ МОДУЛЯЦІЇ І ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АКТИВНОЇ ФАР

І.Г. Леонов, Ю.М. Седишев, П.Ю. Седишев, В.О. Тютюнник, А.Ф. Шевченко

Встановлено кількісний та якісний характер взаємозв'язків структури просторово-часових сигналів, їхніх кореляційних властивостей та параметрів багаточастотної модуляції в активній ФАР та її характеристиками. Результати що отримано, можуть бути застосовані при виборі зондуючих сигналів для РЛС високої продуктивності.

**Ключові слова:** просторово-часовий сигнал, багаточастотна модуляція, активна ФАР.

### CONNECTION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTIFREQUENCY SPATIO-TEMPORAL SIGNALS WITH PARAMETERS OF MODULATION AND DESCRIPTIONS OF ACTIVE PAA

I.G. Leonov, Yu.N. Sedyshev, P.Yu. Sedyshev, V.A. Tyutyunnik, A.F. Shevchenko

The quality and quantitative character of intercommunications by structure of spatio-temporal signals is set, their correlation properties with the parameters of multifrequency modulation in active PAA and its descriptions. Can be drawn on the got results at the choice of probing signals for high capacity radar.

**Keywords:** spatio-temporal signal, multifrequency modulation, active PAA.