

УДК 621.396.96

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ ДЛЯ МОНОИМПУЛЬСНОГО АМПЛИТУДНОГО ПЕЛЕНГАТОРА

С.А. ГОРШКОВ, Е.Н. БУЙЛОВ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 24 сентября 2013

Рассмотрена математическая модель формирования мешающих отражений от подстилающей поверхности и гидрометеоров применительно к амплитудному моноимпульсному пеленгатору, учитывающая пространственную корреляцию помех в каналах приема.

*Ключевые слова:* мешающие отражения, амплитудный моноимпульсный пеленгатор, подстилающая поверхность, гидрометеоры.

### Введение

В ряде работ [1–7], посвященных изучению моноимпульсных систем, работающих в условиях наличия интенсивных пассивных помех, не рассматриваются вопросы взаимной корреляции помех в каналах приема. Анализ особенностей такой корреляции позволит приблизить характеристики моделируемых реализаций мешающих отражений (МО) к реально существующим процессам, а также исследовать вопросы автокомпенсации помех в таких системах. Кроме того, учет взаимной корреляции помех обеспечит увеличение точности угловых измерений моноимпульсных радиолокационных станций (РЛС) при рассмотрении вопросов углового сопровождения маловысотных объектов, что, в свою очередь, облегчит решение задач сопровождения целей.

Целью данной статьи является учет в математической модели поверхностно и объемно распределенных мешающих отражений (МО) межканальной корреляции помех применительно к амплитудному моноимпульсному пеленгатору.

В качестве моноимпульсной системы рассматривается амплитудный пеленгатор с суммарно-разностной обработкой для случая короткоимпульсного излучения [2], который формирует одну передающую и четыре приемных диаграммы направленности антенн (ДНА).

### 1. Математическая модель мешающих отражений для амплитудного моноимпульсного пеленгатора

В общем случае принятый сигнал представляет собой аддитивную смесь отраженного сигнала, шумовой помехи, а также объемно (поверхностно) распределенных МО. Объемно распределенными МО являются отражения от гидрометеоров (дождь, туман, снег, град), а поверхностно распределенными МО – отражения от поверхностей суши и моря [2].

Временная структура МО находится в определенной взаимосвязи с законом модуляции зондирующего сигнала [2]. В качестве математической модели помех, как правило, рассматривается сумма отражений от частиц, распределенных в области, ограниченной шириной ДНА по угловым координатам  $\Delta\beta_a$ ,  $\Delta\varepsilon_a$  и радиальной протяженностью  $\delta r$ , зависящей от длительности одиночного сигнала  $T_0$ . Обобщенная модель формирования МО изложена в [2]. Для использования данной математической модели в системах амплитудной

пеленгации, возникает необходимость учета пространственной корреляции МО и особенностей обеспечения требуемого отношения помеха-шум (ОПШ).

В ходе математического моделирования МО необходимо учесть ряд факторов:

– отношение помеха/шум на выходе устройства внутрипериодной обработки в каналах приема;

– коэффициенты взаимной межканальной корреляции МО;

– временную корреляцию отсчетов МО в каждом канале приема АМП;

– частоту Доплера помехи гидрометеоров.

Применительно к системам амплитудной пеленгации необходимо, более детально, рассмотреть первые две составляющие процесса математического моделирования МО.

### 1.1. Отношение помеха-шум на выходе устройства внутрипериодной обработки в каналах приема

Значение ОПШ объемно (поверхностно) распределенных МО  $\gamma_{v(s)k}$  в АМП определяется: взаимным положением ДНА и отражателей облака (участка); размерами облака (участка); удельной эффективно отражающей поверхностью (ЭОП) отражателей  $\alpha_{v(s)}$ .

Предположим, что угловое направление передающей ДНА совпадает с равносигнальным направлением и характеризуется координатами  $\beta_{РСН}$ ,  $\varepsilon_{РСН}$ . Приемные ДНА смещаются относительно передающей на заданные углы  $\theta_\beta$ ,  $\theta_\varepsilon$  и их пространственное положение определяется угловыми координатами  $\beta_{РПРy_k}$ ,  $\varepsilon_{РПРy_k}$  (рис. 1).

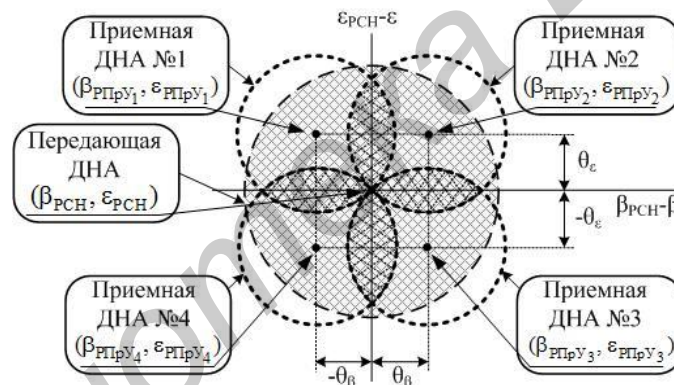


Рис. 1. Схема расположения передающей и приемных ДНА в картинной плоскости

Пространственное положение элементарных участков отражателей определяется их угловыми координатами  $\varepsilon_{v(s)}$ ,  $\beta_{v(s)}$ , которые подсвечиваются и наблюдаются различными участками ДНА, с разными комплексными коэффициентами передачи.

При моделировании область гидрометеоров разбивается на множество малых угловых секторов  $\delta\beta_v$ ,  $\delta\varepsilon_v$  и проинтегрируем отражения от них. Предполагается, что выбор пределов интегрирования ограничен шириной азимутального и угломестного участков подсвечиваемой области с учетом первых боковых лепестков  $2\delta\beta$ ,  $2\delta\varepsilon$ , а удельные ЭОП  $\alpha_v$  всех отражающих участков в пределах  $\delta r$  одинаковы. В дальнейшем поляризационные эффекты пренебрегаются. Соотношение для расчета суммарной ЭОП объемно распределенных МО  $\sigma_{пvk}$  в  $k$ -й приемной ДНА запишется в следующем виде:

$$\sigma_{пvk} = \alpha_v \delta r r^2 \Delta\beta_{v_k} \Delta\varepsilon_{v_k}, \quad (1)$$

где  $\Delta\beta_{v_k} \approx \int_{\beta_{РСН}-\delta\beta}^{\beta_{РСН}+\delta\beta} |f_{РПУ}(\beta_{РСН} - \beta_v) f_{РПРy}(\beta_{РПРy_k} - \beta_v)|^2 d\beta_v$  – ширина азимутального сектора,

подсвечиваемого передающей и наблюдаемого в  $k$ -й приемной ДНА;

$$\Delta\varepsilon_{v_k} \approx \int_{\varepsilon_{\text{рчн}} - \delta\varepsilon}^{\varepsilon_{\text{рчн}} + \delta\varepsilon} \left| f_{\text{РПУ}}(\varepsilon_{\text{РЧН}} - \varepsilon_v) f_{\text{РПРУ}}(\varepsilon_{\text{РПРУ}_k} - \varepsilon_v) \right|^2 d\varepsilon_v \quad - \text{ ширина угломестного сектора,}$$

подсвечиваемого передающей и наблюдаемого в  $k$ -й приемной ДНА;  $r$  – дальность до участка МО;

$f_{\text{РПУ}}(\beta_{\text{РЧН}} - \beta_{s(v)}, \varepsilon_{\text{РЧН}} - \varepsilon_{s(v)})$ ,  $f_{\text{РПРУ}}(\beta_{\text{РПРУ}_k} - \beta_{s(v)}, \varepsilon_{\text{РПРУ}_k} - \varepsilon_{s(v)})$  – комплексные амплитудно-фазовые множители передающей и приемных ДНА, соответственно [1–3].

При одновременном подсвечивании передающей ДНА поверхностно и объемно распределенными МО, нижний предел интегрирования угломестного сектора будет определяться углом места отражающего участка подстилающей поверхности  $\varepsilon_s$ .

Суммарная ЭОП поверхностно распределенных МО  $\sigma_{\text{пс}_k}$  в  $k$ -й приемной ДНА с учетом ослабления мощности помех, вызванного отклонением отражающего участка от направления главного лепестка ДНА, определяется в соответствии с методикой расчета суммарной ЭОП объемно распределенных МО. Предполагается, что углы места элементарных отражателей  $\varepsilon_s$  и их удельные ЭОП  $\alpha_s$ , относительно фазового центра РЛС в пределах элемента разрешения по дальности, одинаковы. Выражение суммарной ЭОП подстилающей поверхности определяется соотношением:

$$\sigma_{\text{пс}_k} = \alpha_s \delta r r \Delta\beta_{s_k} \cdot \left| f_{\text{РПУ}}(\varepsilon_{\text{РЧН}} - \varepsilon_s) f_{\text{РПРУ}}(\varepsilon_{\text{РПРУ}_k} - \varepsilon_s) \right|^2, \quad (2)$$

где  $\Delta\beta_{s_k} \approx \int_{\beta_{\text{рчн}} - \delta\beta}^{\beta_{\text{рчн}} + \delta\beta} \left| f_{\text{РПУ}}(\beta_{\text{РЧН}} - \beta_s) f_{\text{РПРУ}}(\beta_{\text{РПРУ}_k} - \beta_s) \right|^2 d\beta_s$  – ширина азимутального сектора,

подсвечиваемого передающей и наблюдаемого в  $k$ -й приемной ДНА.

Для расчета  $\alpha_s$  и  $\alpha_v$  возможно использовать приближенные эмпирические формулы представленные в [3, 8–11].

В соответствии с полученными выражениями (1) и (2), ОПШ ограниченной области рассеивающих частиц в  $k$ -м канале приема  $\gamma_{v(s)k}$  моноимпульсной РЛС имеет вид:

– для поверхностно распределенных МО:

$$\gamma_{sk} = \frac{\sigma_{s_k}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2} = \frac{P_0 G_{\text{РПУ}} G_{\text{РПРУ}} \lambda^2 \sigma_{\text{пс}_k}}{(4\pi)^3 r^4 N_0 \Delta f_{\text{ш}}}, \quad (3)$$

– для объемно распределенных МО:

$$\gamma_{v_k} = \frac{\sigma_{v_k}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2} = \frac{P_0 G_{\text{РПУ}} G_{\text{РПРУ}} \lambda^2 \sigma_{\text{пв}_k}}{(4\pi)^3 r^4 N_0 \Delta f_{\text{ш}}}, \quad (4)$$

где  $P_0$  – импульсная мощность зондирующего сигнала;  $G_{\text{РПУ}}(G_{\text{РПРУ}})$  – коэффициент направленного действия передающей (приемной) антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $N_0$  – спектральная плотность внутренних шумов приемника;  $\Delta f_{\text{ш}}$  – ширина спектра шума;  $\sigma_{v(s)k}^2$  – мощность поверхностно (объемно) распределенных МО;  $\sigma_{\text{ш}}^2$  – мощность внутренних шумов.

Полученные выражения (3), (4) позволят учитывать особенности требуемого расчета ОПШ при моделировании МО для АМП.

## 1.2. Коэффициенты взаимной межканальной корреляции МО в каналах приема

Коэффициенты взаимной корреляции МО определяются: заданными условиями наблюдения и взаимным положением ДНА и облака (участка).

Выражение для коэффициентов взаимной корреляции МО между  $k$ -м и  $l$ -м каналами

приема  $r_{v(s)k,l}$  ( $k, l = 1, \dots, K$ , где  $K$  – число каналов приема) имеет следующий вид:

– для поверхностно распределенных МО:

$$r_{s,k,l} = \left[ \int_{\beta_{\text{рчн}} - \delta\beta}^{\beta_{\text{рчн}} + \delta\beta} f_{\text{РПУ}}^2(\beta_{\text{рчн}} - \beta_s) f_{\text{РПУ}}(\beta_{\text{РПУ}k} - \beta_s) f_{\text{РПУ}}(\beta_{\text{РПУ}l} - \beta_s) d\beta_s \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta\beta_{s_k} \cdot \Delta\beta_{s_l}}}, \quad (5)$$

– для объемно распределенных МО:

$$r_{s,k,l} = \left[ \int_{\beta_{\text{рчн}} - \delta\beta}^{\beta_{\text{рчн}} + \delta\beta} f_{\text{РПУ}}^2(\beta_{\text{рчн}} - \beta_v) f_{\text{РПУ}}(\beta_{\text{РПУ}k} - \beta_v) f_{\text{РПУ}}(\beta_{\text{РПУ}l} - \beta_v) d\beta_v \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta\beta_{v_k} \cdot \Delta\beta_{v_l}}} \times \\ \times \left[ \int_{\varepsilon_{\text{рчн}} - \delta\varepsilon}^{\varepsilon_{\text{рчн}} + \delta\varepsilon} f_{\text{РПУ}}^2(\varepsilon_{\text{рчн}} - \varepsilon_v) f_{\text{РПУ}}(\varepsilon_{\text{РПУ}k} - \varepsilon_v) f_{\text{РПУ}}(\varepsilon_{\text{РПУ}l} - \varepsilon_v) d\varepsilon_v \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta\varepsilon_{v_k} \cdot \Delta\varepsilon_{v_l}}} \quad (6)$$

Полученные коэффициенты (выражения (5) и (6)) определяют элементы нормированной матрицы взаимной корреляции МО в каналах приема:  $\Phi_{v(s)} = \|r_{v(s)k,l}\|$ .

При одновременном подсвечивании передающей ДНА поверхностно и объемно распределенных МО, нижний предел интегрирования угломестного сектора будет определяться углом места отражающего участка подстилающей поверхности  $\varepsilon_s$ .

Для обеспечения заданной межканальной корреляции МО при моделировании необходимо использовать межканальный формирующий фильтр (ФФ), выходной сигнал которого  $n_{v(s)k,i}$  определяется выражением:

$$n_{v(s)k,i} = \mathbf{L}_{v(s)} \mathbf{x}_{v(s)}^T, \quad (7)$$

$$\text{где } \mathbf{x}_{v(s)} = \begin{pmatrix} x_{v(s) 0,0} & \cdots & x_{v(s) 0,k} & \cdots & x_{v(s) 0,(K-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{v(s) i,0} & \cdots & x_{v(s) i,k} & \cdots & x_{v(s) i,(K-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{v(s) (N-1),0} & \cdots & x_{v(s) (N-1),k} & \cdots & x_{v(s) (N-1),(K-1)} \end{pmatrix} \quad - \text{ матрица } N \times K \quad (K = 4)$$

входных случайных процессов;  $i = 0, \dots, N-1$ , где  $N$  – число моделируемых отсчетов;

$$\mathbf{L}_{v(s)} = h(r_{v(s)}) = \begin{pmatrix} L_{v(s) 11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{v(s) 21} & L_{v(s) 22} & 0 & 0 \\ L_{v(s) 31} & L_{v(s) 32} & L_{v(s) 33} & 0 \\ L_{v(s) 41} & L_{v(s) 42} & L_{v(s) 43} & L_{v(s) 44} \end{pmatrix} \quad - \text{ матричная импульсная характеристика}$$

межканального ФФ МО.

Матрица  $\mathbf{L}_{v(s)}$  определяется в результате факторизации нормированной матрицы взаимной корреляции МО в каналах приема моноимпульсного пеленгатора  $\Phi_{v(s)} = \mathbf{L}_{v(s)} \mathbf{L}_{v(s)}^{*T}$ .

## 2. Обобщенный алгоритм формирования МО

В соответствии с особенностями требуемого расчета ОПШ и оценки коэффициентов взаимной корреляции пассивных помех (подраздел 1.1 и 1.2), обобщенная структурная схема формирования поверхностно и объемно распределенных МО для АМП имеет вид, представленный на рис. 2.

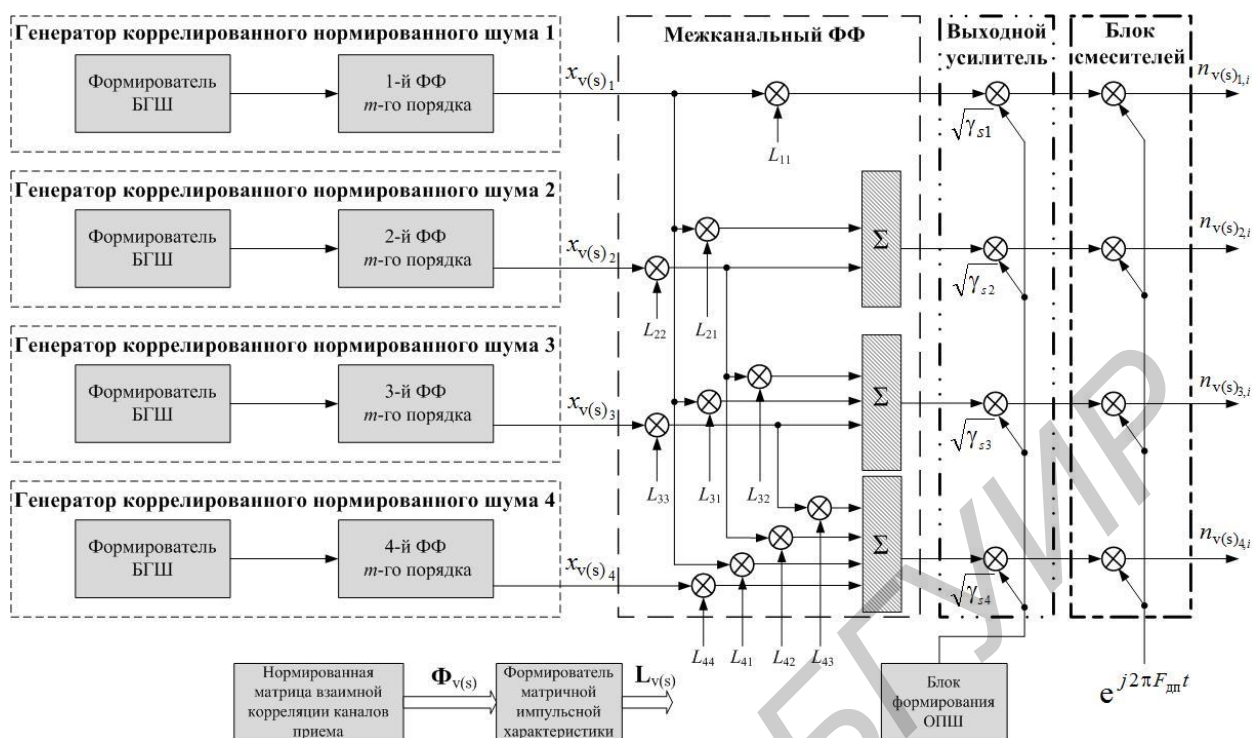


Рис. 2. Обобщенная структурная схема формирования МО

Выходные сигналы формирователей комплексных выборок белого гауссовского шума (БГШ) поступают на ФФ  $m$ -го порядка с заданной амплитудно-частотной характеристикой. Коэффициент  $m$  характеризует форму временной корреляционной функции. В фильтрах случайные процессы приобретают заданные корреляционные свойства по времени и требуемые дисперсии.

Для экспоненциально-параболической аппроксимации корреляционной функции нормированный энергетический спектр коррелированного случайного процесса соответствует выражению [12]:

$$S_n(\omega) = \frac{2\tau_{Lп}}{\left[1 + \left(\frac{\omega\tau_{Lп}}{2}\right)^2\right]^2},$$

$\tau_{Lп}$  – время корреляции случайного процесса.

На выходах ФФ квадратурные составляющие случайных процессов приобретают заданные временные корреляционные свойства. При этом на выходе ФФ необходимо обеспечить требуемую среднюю мощность случайного процесса.

На основании заданной (расчетной) корреляционной матрицы, учитывающей взаимную корреляцию МО между каналами приема, производится расчет матричной импульсной характеристики  $L_{v(s)}$ . В межканальном ФФ выходные сигналы генератора коррелированного нормированного шума (ГКНШ)  $\dot{x}_{v(s)_k}$  домножаются на весовые коэффициенты матрицы  $L_{v(s)}$  (выражение (7)), что обеспечивает требуемую взаимную корреляцию по пространству. В выходном усилителе МО приобретают заданные значения среднего квадратического отклонения  $\sqrt{\gamma_{v(s)_k}}$ , полученные в блоке формирования ОПШ и рассчитанные в соответствии с выражениями (3), (4). Блок смесителей обеспечивает требуемое доплеровское смещение частоты  $F_{дп}$  (для объемно распределенных МО), обусловленного перемещением всех отражателей с радиальной скоростью  $V_{rп}$  [2]. При этом полагается, что в пределах разрешаемого объема ДНА одинаковое направление и радиальная скорость ветра. В этом

случае при моделировании объемно распределенных МО значение  $F_{\text{дп}} = \frac{2V_{\text{рп}}}{\lambda}$ , а поверхностно распределенных –  $F_{\text{дп}} = 0$ .

Таким образом, математическая модель МО  $k$ -го канала приема, полученная для обобщенной структурной схемы формирования помех в АМП (рис. 2), определяется следующим выражением:

$$n(t)_{\text{v(s)}_k} = x(t)_{\text{v(s)}_k} \cdot \mathbf{L}_{\text{v(s)}} \cdot \sqrt{\gamma_{\text{v(s)}_k}} \cdot e^{j2\pi F_{\text{дп}} t}, \quad (8)$$

где  $x(t)_{\text{v(s)}_k} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v(n\Delta t)u(t-n\Delta t)_{\text{вх}_k}$  – коррелированный случайный процесс по времени для  $k$ -го канала приема;  $u(t-n\Delta t)_{\text{вх}_k}$  – временная выборка БГШ для  $k$ -го канала приема;  $v(n\Delta t)$  – импульсная характеристика ФФ  $m$ -го порядка;  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени.

### 3. Результаты расчета коэффициентов взаимной корреляции и матричной импульсной характеристики межканального формирующего фильтра

В ходе математического моделирования проводился расчет коэффициентов взаимной корреляции каналов приема АМП и матричной импульсной характеристики межканального ФФ. При этом использовались следующие исходные данные: число приемных каналов –  $K = 4$ ; ширина передающей ДНА –  $\Delta\varepsilon_{\text{рпУ}} = \Delta\beta_{\text{рпУ}} = 3$  град; ширина приемных ДНА –  $\Delta\varepsilon_{\text{рпУ1}} = \Delta\beta_{\text{рпУ1}} = 2$  град;  $\beta_{\text{рпУ1}} = \beta_{\text{рпУ4}} = -0,7^\circ$ ;  $\beta_{\text{рпУ2}} = \beta_{\text{рпУ3}} = 0,7^\circ$ ;  $\varepsilon_{\text{рпУ1}} = \varepsilon_{\text{рпУ2}} = 0,7^\circ$ ;  $\varepsilon_{\text{рпУ3}} = \varepsilon_{\text{рпУ4}} = -0,7^\circ$ ; длина волны  $\lambda = 3$  мм. Двумерная комплексная амплитудно-фазовая ДНА на прием или передачу представляла собой функцию вида

$$F(\varepsilon, \beta) = \left| \frac{\sin\left[\frac{\pi d_a}{\lambda} \sin(\varepsilon_a - \varepsilon)\right]}{\frac{\pi d_a}{\lambda} \sin(\varepsilon_a - \varepsilon)} \cdot \frac{\sin\left[\frac{\pi d_a}{\lambda} \sin(\beta_a - \beta)\right]}{\frac{\pi d_a}{\lambda} \sin(\beta_a - \beta)} \right| \cdot e^{j[\phi(\varepsilon) + \phi(\beta)]}, \quad \text{где } d_a \text{ – радиус раскрыва}$$

антенны, а  $\phi(\varepsilon)$ ,  $\phi(\beta)$  – фазовые распределения по угловым координатам, которые изменяются по равномерному закону с чередованием фазы в боковых лепестках на  $\pi$  и 0.

Результат расчета нормированной матрицы межканальной корреляции  $\Phi_{\text{s(v)}}$  в соответствии с выражениями (5), (6) имеет вид:

$$\Phi_{\text{s}} = \begin{vmatrix} 1 & 0,7 & 0,7 & 1 \\ 0,7 & 1 & 1 & 0,7 \\ 0,7 & 1 & 1 & 0,7 \\ 1 & 0,7 & 0,7 & 1 \end{vmatrix}, \quad \Phi_{\text{v}} = \begin{vmatrix} 1 & 0,7 & 0,541 & 0,774 \\ 0,7 & 1 & 0,774 & 0,541 \\ 0,541 & 0,774 & 1 & 0,7 \\ 0,774 & 0,541 & 0,7 & 1 \end{vmatrix}.$$

Матричная импульсная характеристика межканального ФФ  $\mathbf{L}_{\text{s(v)}}$ , полученная в результате факторизации  $\Phi_{\text{s(v)}}$ , имеет вид:

$$\mathbf{L}_{\text{s}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & 0,715 & 0 & 0 \\ 0,7 & 0,715 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{L}_{\text{v}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & 0,715 & 0 & 0 \\ 0,541 & 0,533 & 0,633 & 0 \\ 0,774 & 0 & 0,443 & 0,453 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Полученные коэффициенты матрицы  $\mathbf{L}_{\text{s(v)}}$  (9) могут использоваться, в дальнейшем, для

формирования коррелированных по пространству временных последовательностей МО в приемных каналах моноимпульсного амплитудного пеленгатора (рис. 2).

### Заключение

Получена математическая модель формирования МО (выражение (8)) для поверхностно и объемно распределенных отражателей в АМП при короткоимпульсном излучении. Данная модель позволяет учитывать временную (ГКНШ) и межканальную корреляцию (межканальный ФФ) случайных отсчетов; требуемую дисперсию в каналах приема (выходной усилитель); частоту Доплера помехи гидрометеоров (блок смесителей). Использование предлагаемой математической модели формирования МО позволит повысить точность угловых измерений и способствует улучшению возможностей сопровождения целей в АМП на фоне интенсивных пассивных помех.

## MATHEMATICAL MODEL OF STIRRING REFLECTIONS FOR THE MONOPULSE PEAK DIRECTION FINDER

S.A. GORSHKOV, E.N. BUILOV

### Abstract

The mathematical model of formation of stirring reflexions from a spreading surface and hydrometeors with reference to the peak monopulse direction finder, considering spatial correlation of hindrances in reception channels is considered.

### Список литературы

1. *Леонов А.И., Фомичев К.И.* Моноимпульсная радиолокация. М., 1984.
2. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1 Основы радиолокации. М., 1983.
3. *Шурман Я.Д.* Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. М., 2007.
4. *Monakov A.* // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012. Vol. 48, № 3. P. 2653–2655.
5. *Ostravtayanov R.V., Basalov F.A.* Statistical Theory of Extended Radar Targets. Norwood, 1985.
6. *Kirkpatrick G.M.* // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2009. Vol. 45, № 2. P. 807–818.
7. *Willett P., Blair W., Bar-Shalom Y.* // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39, № 2. P. 533–549.
8. Справочник по радиолокации. / Под. ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970.
9. *Красюк Н.П., Розенберг В.И.* Корабельная радиолокация и метеорология. Л., 1970.
10. *Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н.* Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. М., 1988.
11. *David K. Barton.* Radar system analysis and modeling. Boston, 2005.
12. *Ярмолик С.Н., Солонар А.С.* // Сб. науч. статей ВА РБ. 2008. № 15. С. 87–91.