

Об эффективности мобильной системы гидроакустического мониторинга

В. Г. Арсентьев

Рассматривается задача оценки эффективности мобильной системы гидроакустического мониторинга в условиях воздействия локальных помех с учётом реальных конструкторско-технологических характеристик многоэлементной антенной решётки.

Ключевые слова: цилиндрическая антенная решётка, диаграмма направленности, когерентная компенсация помех, энергетические характеристики системы.

1. Введение

Алгоритмический облик мобильной системы гидроакустического мониторинга включает в себя две основополагающие составляющие: современные адаптивные алгоритмы подавления анизотропных и нестационарных помех (шумов водной среды, локальных помех) и алгоритмы для решения обратных задач подводного наблюдения (обнаружения и классификации различных объектов).

По совокупности требований и результатам соответствующих исследований [1, 2] для мобильных систем гидроакустического мониторинга предпочтительны антенны в виде многоэлементных антенных решёток (МАР) с оптимальной формой в виде однослойного цилиндра определённого диаметра и высоты (рис. 1).



Рис. 1. 240-элементная МАР мобильного развёртывания

Требования мобильности, простоты постановки и подъёма антенны накладывают определённые ограничения на её вертикальный размер и диаметр. Диаметр не должен превосходить 4 – 6 м, а высота должна быть не более 10 м. Эти показатели обычно считаются предельными, и всегда стремятся к их минимизации.

Требование автономности накладывает определённые ограничения на энергопотребление, а следовательно, и на число гидрофонных модулей (ГМ) такой антенны. Для мобильных систем мониторинга, использующих диапазон частот от 1.5 до 5 кГц, рекомендованы цилиндрические МАР с количеством элементов 240 – 260, имеющие порядка 10 «этажей» (кольцевых подрешёток) с числом ГМ в каждой подрешётке 24 – 26, расположенных на расстоянии немного меньшем половины длины волны средней частоты рабочего диапазона системы.

При этом указанная конструкция МАР оказывается достаточно удобной и при реализации процедуры подавления локальных помех, так как позволяет выполнять когерентную компенсацию помех отдельно для каждой кольцевой подрешётки, имеющей в соответствии со спецификой гидроакустического канала наибольшую корреляцию принимаемых сигналов по апертуре.

Кроме того, архитектура МАР для сокращения энергопотребления может предусматривать фильтрацию парциальных сигналов решётки, реализуемую с использованием аналоговых частотных фильтров. На этапе решения задач обнаружения и классификации объектов наблюдения обобщённая структура системы мониторинга имеет конфигурацию, рассмотренную в статье [3], которая характерна для большинства систем с пространственно-многоканальной обработкой сигналов.

В настоящей статье представлены результаты исследований мобильной системы мониторинга, направленные на оценку:

- энергетических потерь при подавлении локальных помех в зависимости от технологического разброса передаточных характеристик частотных фильтров ГМ;
- влияния технологических разбросов установки ГМ в цилиндрической МАР на её характеристики направленности;
- ожидаемого энергетического выигрыша в отношении сигнал/помеха при использовании в системе 240-элементной цилиндрической МАР.

2. Энергетические потери в системе мониторинга, обусловленные технологическим разбросом передаточных характеристик частотных фильтров ГМ МАР

Оценка указанных характеристик базируется на экспериментальных данных, полученных в процессе выполнения ОКР при изготовлении двух партий ГМ в количестве 350 штук (рис. 2). Приведённые ниже оценки энергетических потерь в системе гидроакустического мониторинга показывают её предельные возможности по эффективности подавления локальных помех при реальных, достигнутых на стадии эскизного проекта, передаточных характеристиках аналоговых фильтров, обеспечивающих частотную селекцию парциальных сигналов в МАР.

2.1. Основные расчётные соотношения

Для оценки энергетических потерь при подавлении локальных помех в условиях реального технологического разброса передаточных характеристик (АЧХ и ФЧХ) частотных фильтров ГМ МАР воспользуемся аналитическими соотношениями, представленными в [3].

Энергетические потери, вызванные разбросом передаточных характеристик частотных фильтров ГМ и характеризующие снижение эффективности подавления локальных помех, по сравнению со случаем, когда тракты частотной селекции МАР имеют абсолютно иден-

точные передаточные характеристики, могут быть оценены на основе следующего соотношения:

$$\text{ЭП} = 10 \times \lg \left\{ \frac{(1+S)(1+SM)}{1+S(M+1)} \left\{ 1 - \frac{\chi^2 MS^2}{(1+S) 1+S[1+(M-1)|\chi|]} \right\} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{где } \chi = \left[1 - \Upsilon \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\xi^2} \right) \right] \left| \frac{\sin \left(\frac{\pi \Delta \varphi}{180} \right)}{\xi} \right| - \frac{\Upsilon}{\xi^2} \cos \left(\frac{\pi \Delta \varphi}{180} \right); \quad \xi = \frac{\pi \Delta \varphi}{180}; \quad \Upsilon = \frac{1}{2} \left(10^{\frac{\Delta K}{20}} - 1 \right)^2;$$

S – отношение мощностей (в разях) коррелированной составляющей локальной помехи и некоррелированной составляющей шума среды (изотропного шума) на выходах ГМ кольцевой подрешётки;

M – количество ГМ кольцевой подрешётки;

$\Delta \varphi$ – максимальный разброс ФЧХ (в градусах);

ΔK – максимальное отклонение друг от друга АЧХ (в дБ) аналоговых фильтров ГМ кольцевой подрешётки.

Указанные соотношения позволяют оценить энергетические потери в системе гидроакустического мониторинга при подавлении локальных помех с использованием метода когерентной компенсации, обеспечивающего наибольший энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха.

Величина S определяет предельный уровень подавления локальных помех, к которому следует стремиться при реализации различных алгоритмических процедур, рекомендуемых к использованию, при когерентной компенсации помех. Представляющие практический интерес значения S для гидроакустического канала могут находиться в пределах от 0 до 60 дБ.

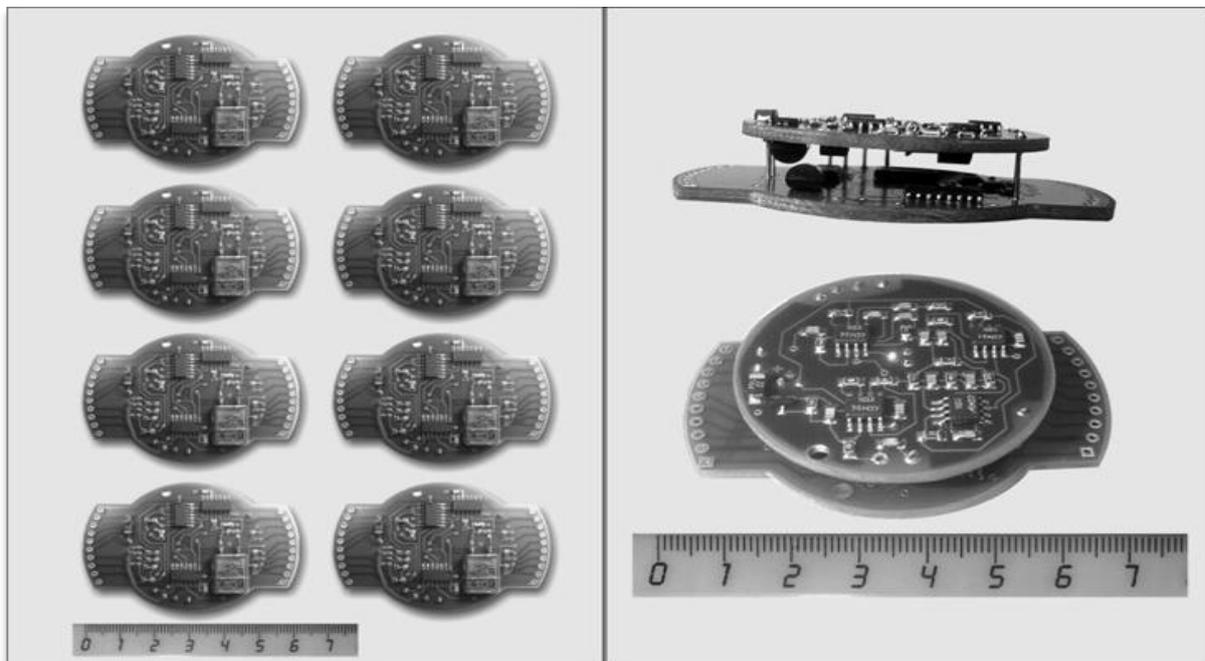


Рис. 2. Электронные компоненты ГМ МАР

С практической точки зрения важна оценка ожидаемой эффективности подавления локальных помех в условиях технически достижимой однородности (идентичности) парциаль-

ных каналов МАР для самого неблагоприятного разброса передаточных характеристик частотных фильтров. В этом отношении используемое для расчётов соотношение (1) даёт несколько завышенную величину потерь (оценку сверху), но для оценочных расчётов общесистемного характера этого вполне достаточно, тем более что получаемые при оценке результаты неоднократно проверены на практике при разработке систем подавления помех в каналах различных диапазонов частот.

Эффективность системы мониторинга ($\mathcal{E}C$) по подавлению локальных помех при технологическом разбросе передаточных характеристик частотных фильтров парциальных каналов МАР определяется, с учётом (1), следующей зависимостью:

$$\mathcal{E}C = S - \mathcal{E}П, \quad (2)$$

где S и $\mathcal{E}П$ выражены в дБ.

2.2. Результаты расчётов

Оценку ожидаемых энергетических потерь в системе мониторинга при подавлении локальных помех проведём для двух случаев: использования в МАР широкополосных ГМ (ШГМ) с относительной полосой частот (величиной отношения полосы частот к средней частоте спектра), равной 2.0, и применения узкополосных ГМ (УГМ), рассчитанных на относительную полосу частот 0.4, разработанных и изготовленных на этапе эскизного проекта ОКР.

Для партии ШГМ в количестве 50 штук по результатам лабораторных испытаний получены следующие характеристики частотных фильтров: максимальное отклонение АЧХ образцов (ΔK) в заданной полосе частот не более 0.5 дБ, а максимальный разброс их ФЧХ в указанной полосе $\Delta\varphi \leq 7^\circ$.

Оценки ожидаемых энергетических потерь и эффективность системы обнаружения по подавлению локальных помех, полученные на основе соотношений (1) и (2), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Энергетические потери и эффективность системы мониторинга в зависимости от интенсивности локальных помех при использовании ШГМ

S , дБ	0	3	7	10	20	30	40	50	60	70
$\mathcal{E}П$, дБ	0.01	0.02	0.06	0.12	1.06	5.8	14.6	24.5	34.5	44.5
$\mathcal{E}C$, дБ	- 0.01	2.98	6.94	9.88	18.94	24.2	25.4	25.5	25.5	25.5

Полученные результаты свидетельствуют о том, что энергетические потери за счёт технологического разброса передаточных характеристик частотных фильтров ГМ МАР в условиях воздействия локальных помех:

- малой интенсивности ($S < 10$ дБ) составляют доли дБ, а возможная эффективность системы по подавлению локальных помех может быть близка к предельно достижимой;
- средней интенсивности ($10 \leq S \leq 30$ дБ) начинают существенно увеличиваться и могут достигать величины 6 дБ, при этом эффективность подавления локальных помех в системе не будет превышать 24 дБ;
- большой интенсивности ($S > 30$ дБ) возрастают пропорционально интенсивности помех и ограничивают эффективность их подавления в системе величиной 25 – 26 дБ.

Применительно к партии УГМ в количестве 300 штук, изготовленной для 240-элементной цилиндрической МАР, получены следующие характеристики частотных фильтров: максимальное отклонение АЧХ образцов в заданной полосе частот не более 0.6 дБ, а максимальный разброс их ФЧХ в указанной полосе $\Delta\varphi \leq 4^\circ$.

Оценки ожидаемых энергетических потерь и эффективность системы мониторинга по подавлению локальных помех приведены в табл. 2.

Таблица 2. Энергетические потери и эффективность системы мониторинга в зависимости от интенсивности локальных помех при использовании УГМ

S, дБ	0	3	7	10	20	30	40	50	60	70
ЭП, дБ	0.005	0.01	0.03	0.05	0.5	3.5	11.3	21.0	31.0	41.0
ЭС, дБ	-0.005	2.99	6.97	9.95	19.5	26.5	28.7	29.0	29.0	29.0

Результаты, полученные для УГМ, аналогичны результатам для ШГМ, с той лишь разницей, что возможное подавление локальных помех средней интенсивности в системе мониторинга может достигать величины 26 – 27 дБ, а максимально достижимое подавление помех большой интенсивности при реально полученных передаточных характеристиках частотных фильтров не будет превышать уровня 29 – 30 дБ.

Таким образом, эффективность подавления локальных помех в системе мониторинга при практически достижимой идентичности передаточных характеристик частотных фильтров МАР не превышает величины порядка 26 – 30 дБ при условии, что процедура подавления помех реализует потенциальные возможности самого алгоритма когерентной компенсации. Однако реализация даже самого оптимального алгоритма всегда связана с конкретными техническими ограничениями, которые снижают его потенциальные возможности до определённой величины эффективности.

В качестве таких ограничений рассмотрим влияние конфигурации и конструкции МАР (последнее, с точки зрения обеспечения необходимых конструктивно-технологических допусков на размещение ГМ МАР) на эффективность мобильной системы гидроакустического мониторинга по подавлению помех локальных источников при использовании наиболее эффективной процедуры их подавления.

3. Влияние конструкции МАР на характеристики системы мониторинга

Для 240-элементной цилиндрической МАР, образованной десятью кольцевыми подрешётками по 24 элемента в каждой, оценим влияние неточности установки ГМ МАР на её характеристики направленности и определим допустимые технологические разбросы установки ГМ указанной МАР. Вышеупомянутые исследования проведём в двух направлениях:

- оценка влияния и определение допустимых разбросов установки ГМ для МАР в целом;
- оценка влияния и определение допустимых разбросов установки ГМ в кольцевых подрешётках цилиндрической МАР при осуществлении процедуры подавления локальных помех.

3.1. Влияние неточности установки ГМ МАР на её характеристики направленности

Для аналитической оценки указанного влияния необходимо иметь математическое выражение, описывающее диаграмму направленности (ДН) цилиндрической МАР с учётом возможной неточности установки её элементов (ГМ) в заданной конструкции. При этом целесообразно рассмотреть влияние следующих параметров технологии изготовления МАР:

- неточность установки ГМ по длине окружности в кольцевых подрешётках, на базе которых строится цилиндрическая МАР;
- неточность установки ГМ по радиусу окружности в кольцевых подрешётках;
- неточность установки самих кольцевых подрешёток по высоте цилиндра – разброс высот «этажей» МАР.

Это позволит в первом приближении оценить степень влияния указанных технологических разбросов на характеристики МАР и свести к минимуму их влияние на этапе изготовления опытного образца 240-элементной антенной решётки, предназначенного, например, для соответствующих натуральных экспериментов.

Аналитическое выражение, используемое для расчёта нормированной ДН (выраженной в дБ) цилиндрической МАР и учитывающее вышеперечисленные технологические разбросы изготовления (выводы расчётных соотношений здесь и далее не приводятся по соображениям уменьшения объёма вспомогательного материала), имеет следующий вид:

$$D(\alpha, \theta) = 10 \times \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m H_i H_k C_j C_l \frac{\sin \pi \Phi \Gamma_{ijkl}(\alpha, \beta, \theta, \phi)}{\pi \Phi \Gamma_{ijkl}(\alpha, \beta, \theta, \phi)} \cos 2\pi \Gamma_{ijkl}(\alpha, \beta, \theta, \phi)}{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m H_i H_k C_j C_l}, \quad (3)$$

где $\psi_{ij} = 1 + \Delta R_{ij}$; $\mu_j = j - 1$; $\xi_j = j - 1 + \Delta n_j$; $\eta_i = \frac{2\pi(i-1)}{M}$; $\gamma_{ij} = \frac{2\pi(i-1 + \Delta N_{ij})}{M}$;

$$A_{ik}(\beta, \phi) = \left[\cos\left(\eta_i - \frac{\pi\beta}{180}\right) - \cos\left(\eta_k - \frac{\pi\beta}{180}\right) \right] \sin \frac{\pi\phi}{180};$$

$$B_{ijkl}(\alpha, \theta) = \left[\psi_{ij} \cos\left(\gamma_{ij} - \frac{\pi\alpha}{180}\right) - \psi_{kl} \cos\left(\gamma_{kl} - \frac{\pi\alpha}{180}\right) \right] \sin \frac{\pi\theta}{180};$$

$$E_{jl}(\phi, \theta) = n \left[\mu_j - \mu_l \cos \frac{\pi\phi}{180} - \xi_j - \xi_l \cos \frac{\pi\theta}{180} \right];$$

$$\Gamma_{ijkl}(\alpha, \beta, \theta, \phi) = \frac{NM}{2\pi} \left[A_{ik}(\beta, \phi) - B_{ijkl}(\alpha, \theta) \right] + E_{jl}(\phi, \theta);$$

M – число элементов каждой кольцевой подрешётки (в нашем случае 24);

m – число кольцевых подрешёток цилиндрической МАР (принято равным 10);

N, n – относительные расстояния соответственно между элементами (ГМ) каждой кольцевой подрешётки по длине окружности и между соседними «этажами» кольцевых подрешёток цилиндрической МАР, приведённые к длине волны средней частоты спектра принимаемых сигналов;

α, θ – азимут и угол места (выраженные в градусах) при расчётах ДН МАР в азимутальной и угломестной плоскостях соответственно;

β, ϕ – углы (направления) фазирования (в градусах) цилиндрической МАР соответственно в азимутальной и угломестной плоскостях;

$\Delta N_{ij}, \Delta R_{ij}$ – относительные неточности установки i -го элемента j -той кольцевой подрешётки цилиндрической МАР соответственно по длине и радиусу окружности;

Δn_j – относительная неточность установки j -той кольцевой подрешётки в «этаже» цилиндрической МАР;

Φ – относительная полоса частот принимаемых ГМ МАР сигналов;

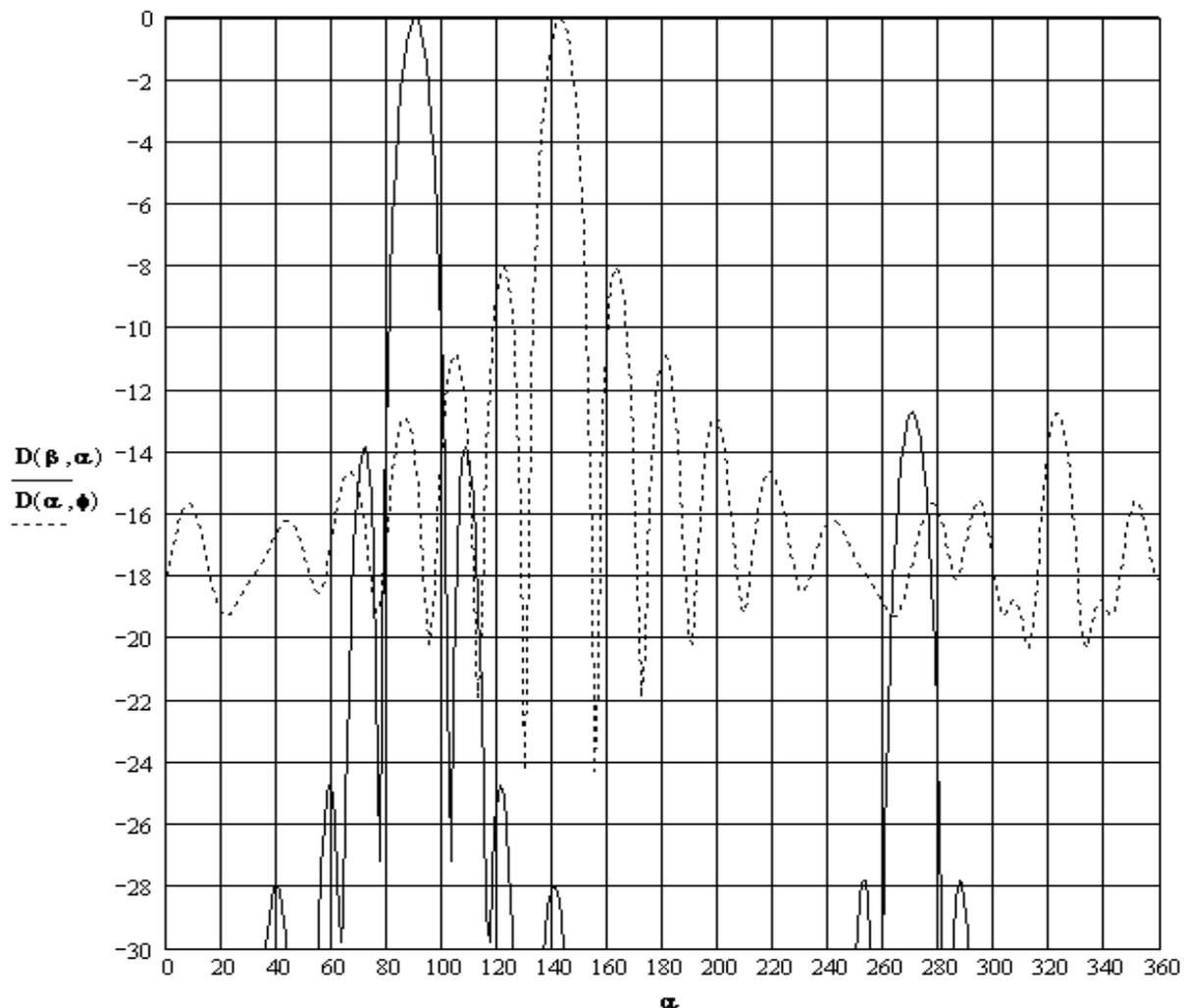
H_i – весовые коэффициенты ($i = 1 \dots M$), минимизирующие уровень боковых лепестков (УБЛ) каждой кольцевой подрешётки в азимутальной плоскости;

C_j – весовые коэффициенты ($j = 1 \dots m$), минимизирующие УБЛ цилиндрической МАР в угломестной плоскости.

На рис. 3 и рис. 4 представлены нормированные ДН «идеальной», т.е. без учёта технологических разбросов изготовления (параметры $H_i = 1, C_j = 1, \Delta N_{ij} = 0, \Delta R_{ij} = 0, \Delta n_j = 0$), 240-элементной цилиндрической МАР, рассчитанные на основе соотношения (3), для двух прак-

тически интересных значений (параметр Φ равен 0.15 и 0.65) относительной полосы частот обрабатываемых сигналов. При этом базовые параметры МАР в расчётах были заданы, исходя из следующих соображений:

- относительное расстояние между элементами каждой кольцевой подрешётки по длине окружности (параметр N) и относительное расстояние между соседними «этажами» кольцевых подрешёток цилиндрической МАР (параметр n) взяты одинаковыми и равными 0.45, что обусловлено стремлением, с одной стороны, уменьшить УБЛ ДН в направлениях антиподных главному, с другой стороны, – обеспечить слабую корреляцию шумов среды по апертуре решётки, особенно в азимутальной плоскости;
- углы (направления) фазирования МАР в азимутальной (параметр β) и угломестной (параметр ϕ) плоскостях для более наглядного графического представления ДН выбраны соответственно 142.5° и 90° .



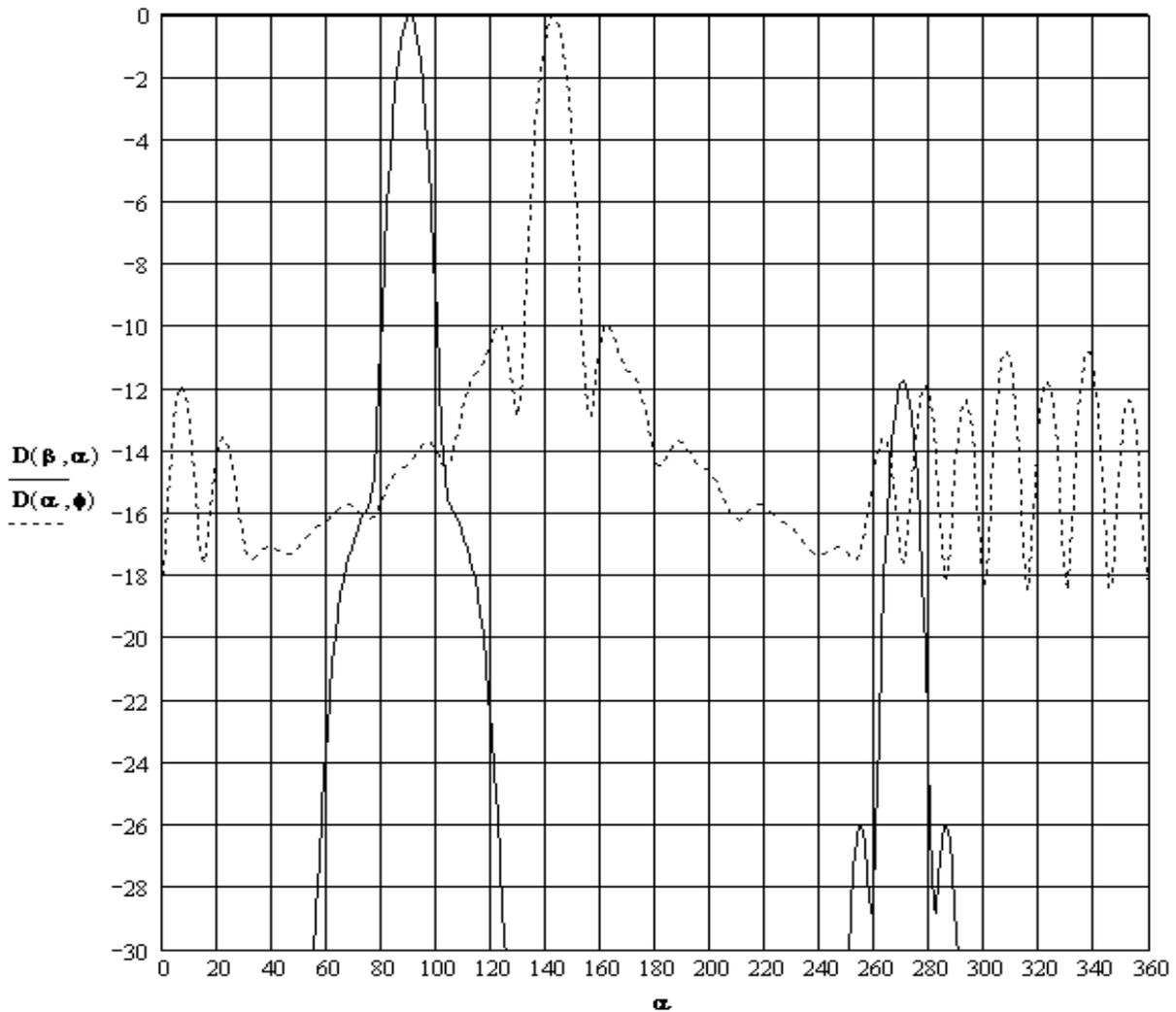
$D(\beta, \alpha)$ - ДН в угломестной плоскости; $D(\alpha, \phi)$ - ДН в азимутальной плоскости.

Рис. 3. ДН цилиндрической МАР, относительная полоса частот 15 %

Результаты расчётов показывают, что для «идеальной» 240-элементной цилиндрической МАР можно обеспечить:

- ширину основного лепестка ДН (по уровню -3 дБ) в азимутальной плоскости и минимальную ширину основного лепестка ДН в угломестной плоскости около 12.5° ;

- для 15 % относительной полосы частот обрабатываемых сигналов максимальный УБЛ ДН в азимутальной плоскости около -8 дБ, а в угломестной плоскости около -12.5 дБ;
- для 65 % относительной полосы частот обрабатываемых сигналов максимальный УБЛ ДН в азимутальной плоскости около -10 дБ, а в угломестной плоскости около -12 дБ.



$D(\beta, \alpha)$ - ДН в угломестной плоскости; $D(\alpha, \phi)$ - ДН в азимутальной плоскости.

Рис. 4. ДН цилиндрической МАР, относительная полоса частот 65 %

Сравнивая ДН МАР для разных значений параметра Φ , нетрудно заметить, что максимальный УБЛ ДН МАР в азимутальной плоскости с увеличением полосы частот обрабатываемых сигналов несколько уменьшается, а в угломестной плоскости практически не изменяется, поскольку определяется антиподным интерференционным максимумом, обусловленным регулярной структурой решётки в этой плоскости. УБЛ ДН рассматриваемой решётки в направлении этого интерференционного максимума не может быть существенно уменьшен даже при использовании специальной весовой обработки, что заметно снижает возможности однослойной цилиндрической МАР с регулярным вертикальным развитием по пространственной селекции локальных помех.

В качестве иллюстрации к сказанному, на рис. 5 представлены нормированные ДН «идеальной» цилиндрической МАР в случае использования весовой обработки, минимизирующей УБЛ её ДН, для 15 % относительной полосы частот обрабатываемых сигналов. Задан-

ные уровни минимизации боковых лепестков ДН при расчётах весовых коэффициентов (параметров H_i и C_j) составили: в азимутальной плоскости -13 дБ, в угломестной плоскости -30 дБ.

Как известно [4], весовая обработка, с целью уменьшения УБЛ ДН решётки, приводит к расширению основного лепестка её ДН. Для приведённых на рис. 5 характеристик направленности указанная тенденция проявляется следующим образом: ширина основного лепестка ДН МАР в азимутальной плоскости увеличивается с 12.5° до 14° , а ширина основного лепестка ДН в угломестной плоскости увеличивается с 12.5° до 15° . При этом максимальный УБЛ ДН цилиндрической решётки, определяющий её помехозащищенность, не превышает -13 дБ.

Оценку влияния и определение допустимых разбросов установки ГМ в кольцевых подрешётках цилиндрической МАР при осуществлении процедуры подавления локальных помех будем производить на основе соотношения, описывающего нормированную ДН кольцевой подрешётки и имеющего следующий вид:

$$D(\alpha, \theta) = 10 \times \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H_i H_j \frac{\sin \frac{1}{2} \Phi \Gamma_{ij}(\alpha, \beta, \theta, \phi)}{\frac{1}{2} \Phi \Gamma_{ij}(\alpha, \beta, \theta, \phi)} \cos \Gamma_{ij}(\alpha, \beta, \theta, \phi)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H_i H_j}, \quad (4)$$

где $\psi_i = 1 + \Delta R_i$; $\eta_i = \frac{2\pi(i-1)}{M}$; $\gamma_i = \frac{2\pi(i-1 + \Delta N_i)}{M}$;

$$A_{ij}(\beta, \phi) = \left[\cos\left(\eta_i - \frac{\pi\beta}{180}\right) - \cos\left(\eta_j - \frac{\pi\beta}{180}\right) \right] \sin \frac{\pi\phi}{180};$$

$$B_{ij}(\alpha, \theta) = \left[\psi_i \cos\left(\gamma_i - \frac{\pi\alpha}{180}\right) - \psi_j \cos\left(\gamma_j - \frac{\pi\alpha}{180}\right) \right] \sin \frac{\pi\theta}{180};$$

$$\Gamma_{ij}(\alpha, \beta, \theta, \phi) = NM \left[A_{ij}(\beta, \phi) - B_{ij}(\alpha, \theta) \right].$$

Символьные обозначения параметров выражения (4) соответствуют обозначениям, принятым в соотношении (3).

Для оценки влияния технологических разбросов установки ГМ на характеристики направленности кольцевой подрешётки вначале рассчитаем ДН «идеальной» 24-элементной кольцевой решётки, когда технологические разбросы изготовления не учитываются.

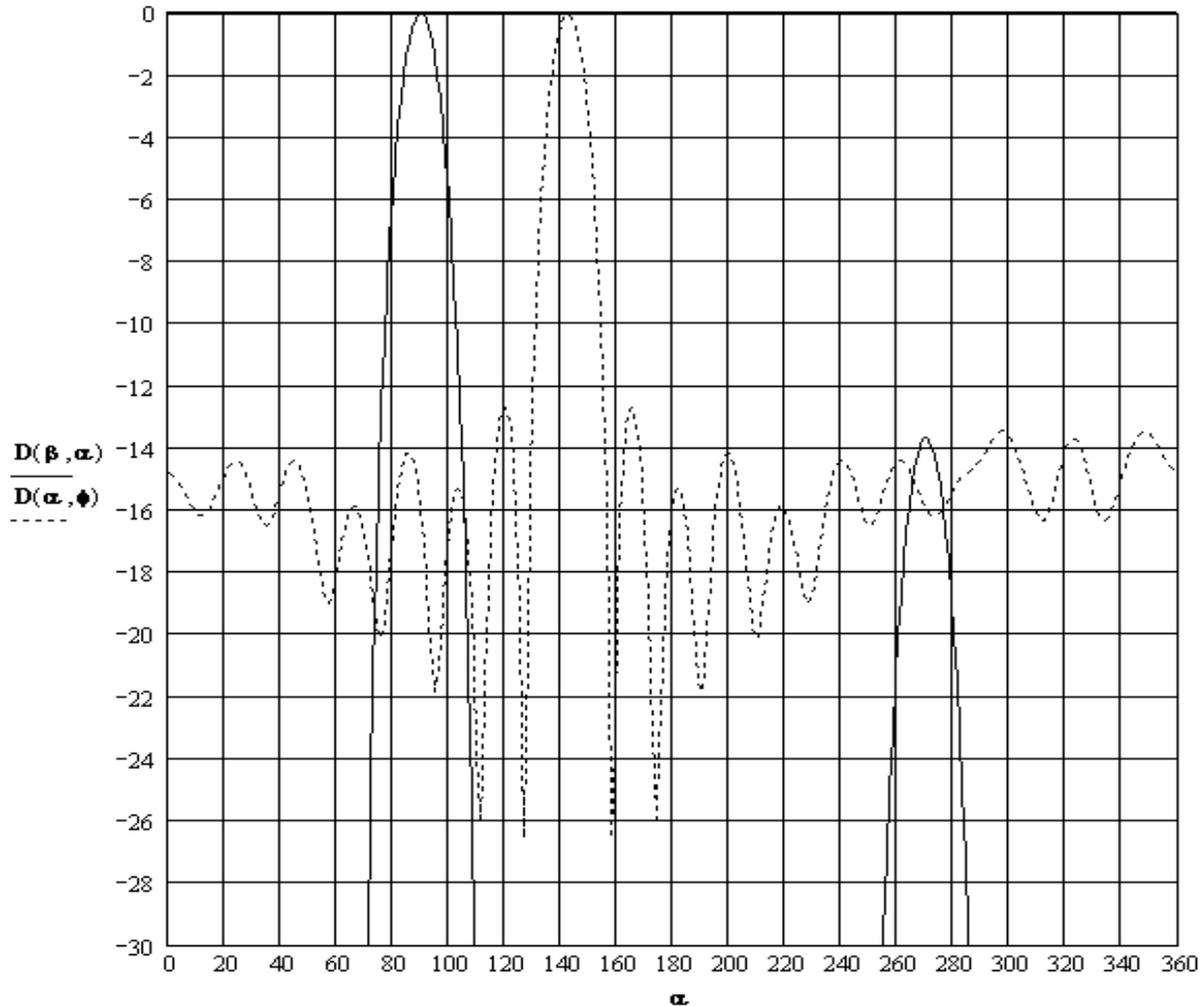
На рис. 6 и рис. 7 представлены ДН такой решётки для 15 % относительной полосы частот обрабатываемых сигналов применительно к двум случаям:

- фазированию решётки без использования весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН;
- фазированию решётки с использованием весовой обработки, уменьшающей максимальный УБЛ ДН в азимутальной плоскости до -13 дБ.

Рассматриваемая «идеальная» кольцевая подрешётка имеет ширину основного лепестка ДН в азимутальной плоскости около 12.5° при отсутствии весовой обработки и около 14° в случае её использования с вышеуказанной эффективностью. Ширина основного лепестка ДН в угломестной плоскости при этом составляет около 53° . При наличии отклонений цилиндрической МАР от вертикальной оси, не превышающих 10° , этого достаточно для уверенного приёма сигналов в условиях разных глубин и гидрологий при реализации процедуры подавления локальных помех.

Направления фазирования в азимутальной и угломестной плоскостях (параметры β и ϕ) кольцевой подрешётки при расчётах для корректности сравнения взяты такими же, как и при расчётах ДН цилиндрической МАР.

Следует заметить, что при весовой обработке, уменьшающей УБЛ ДН кольцевой подрешётки в азимутальной плоскости, возможно увеличение УБЛ ДН в угломестной плоскости (см. рис. 6 и рис. 7). Это обстоятельство не является сдерживающим фактором при подавлении локальных помех, но может привести к некоторому ухудшению результирующего энер-



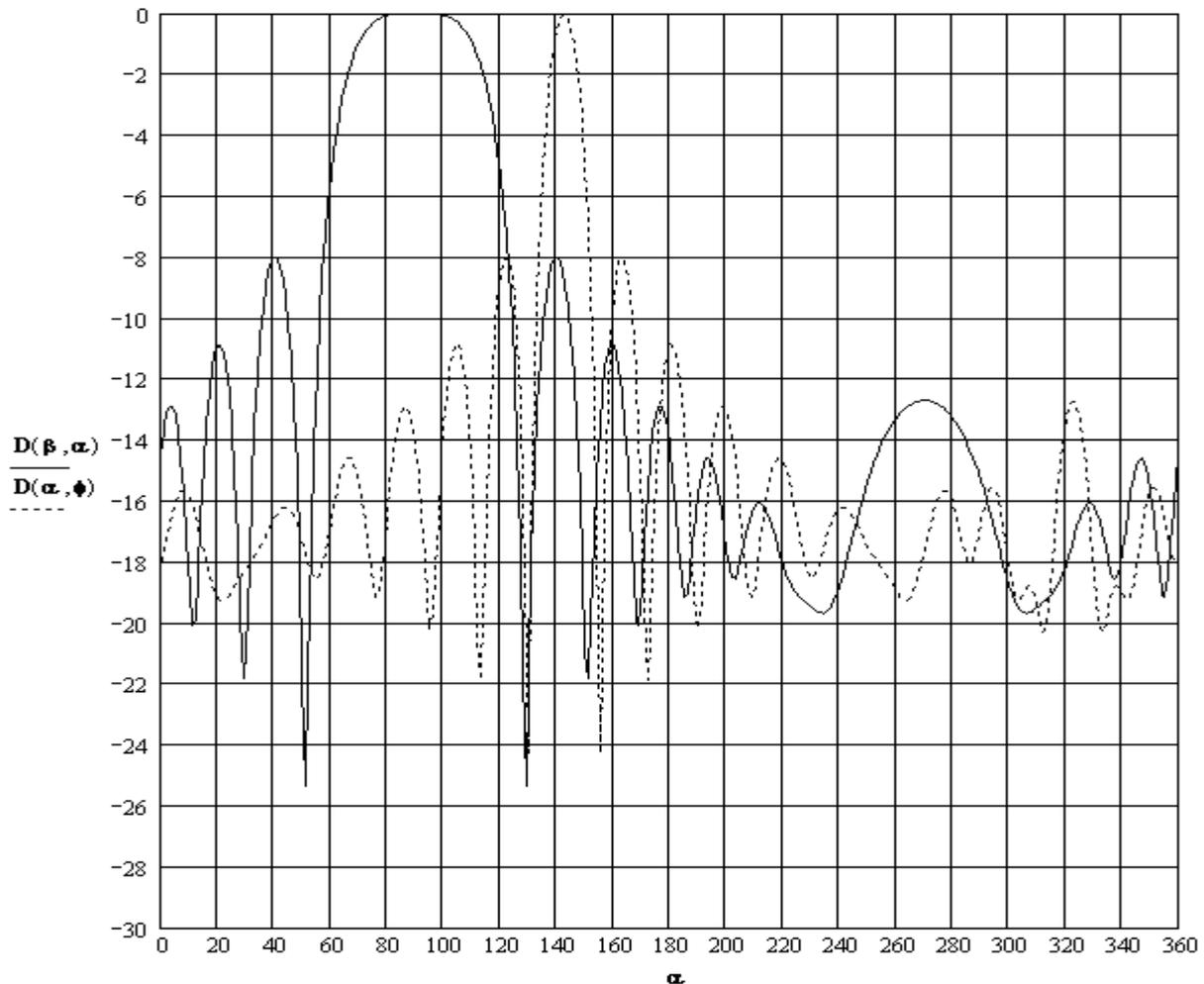
$D(\beta, \alpha)$ - ДН в угломестной плоскости; $D(\alpha, \phi)$ - ДН в азимутальной плоскости.

Рис. 5. ДН цилиндрической МАР, относительная полоса частот 15 %, наличие весовой обработки с целью уменьшения УБЛ ДН

гетического выигрыша в отношении сигнал/помеха, например, за счёт увеличения интенсивности поверхностного шума среды, поступающего в приёмный тракт системы мониторинга по боковым лепесткам ДН.

Расчёты на основе соотношений (3) и (4) показывают, что влияние технологических разбросов установки ГМ в рассматриваемых антенных решётках проявляется, главным образом, в уменьшении их коэффициента усиления и изменении структуры и уровня боковых лепестков ДН, в наихудшем варианте – в увеличении УБЛ ДН. В существенно меньшей степени неточность установки ГМ сказывается на увеличении ширины основного лепестка ДН (по уровню -3 дБ): это влияние ощутимо только при очень больших технологических погрешностях установки элементов подрешётки. Так, например, при разбросах межэлементно-

го расстояния в кольцевых подрешётках (параметр ΔN_{ij}) и «межэтажного» расстояния в цилиндрической МАР (параметр Δl_j), достигающих величины 12 %, радиальных смещениях элементов в кольцевых подрешётках (параметр ΔR_{ij}), ограниченных максимальной величиной 10 %, наблюдаются:



$D(\beta, \alpha)$ - ДН в угломестной плоскости; $D(\alpha, \phi)$ - ДН в азимутальной плоскости.

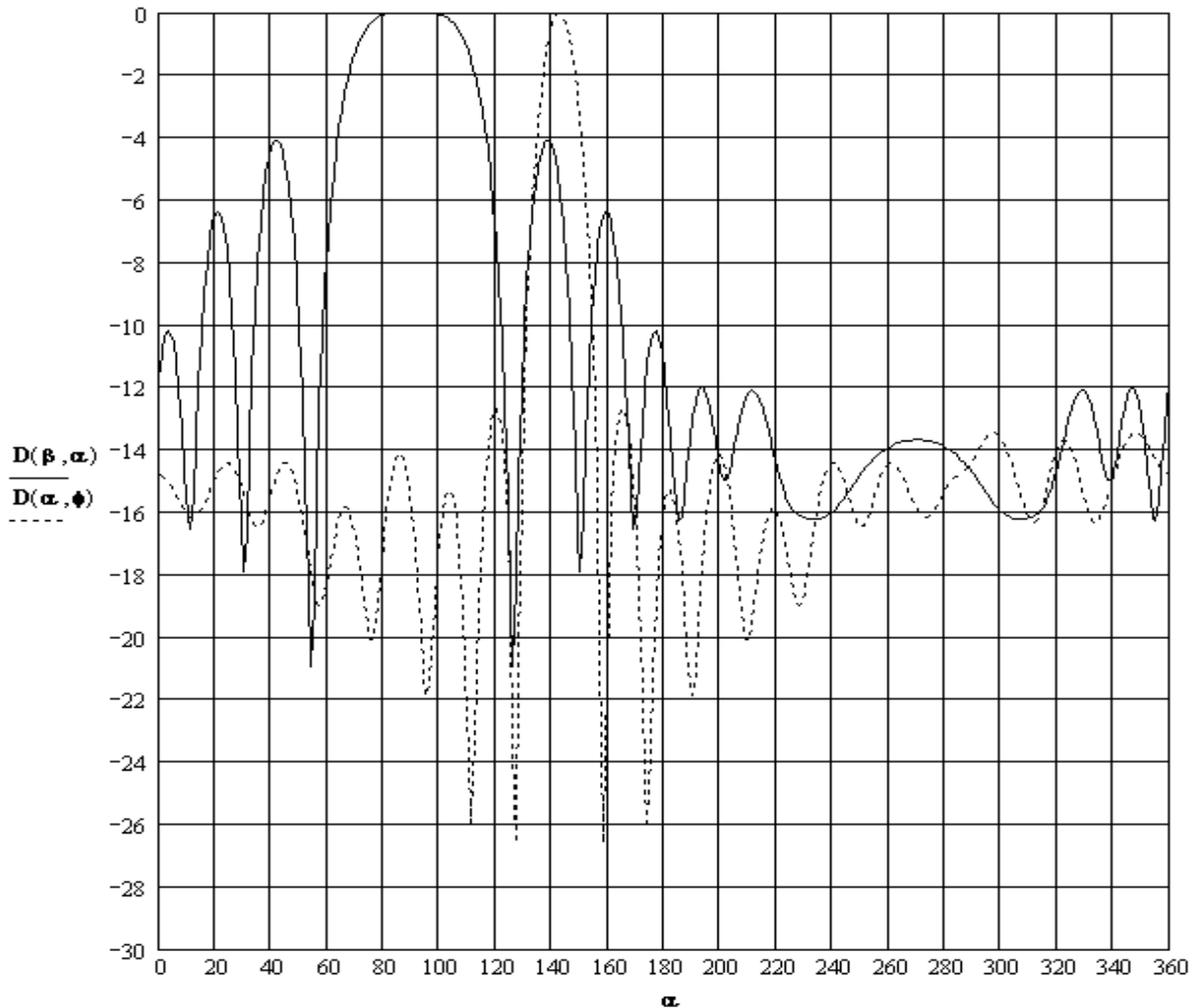
Рис. 6. ДН кольцевой подрешётки, относительная полоса частот 15%,
весовая обработка с целью уменьшения УБЛ ДН отсутствует

- уменьшение на 2 дБ коэффициентов усиления кольцевой подрешётки и цилиндрической МАР при отсутствии весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН;
- уменьшение на 3 дБ коэффициента усиления цилиндрической МАР при наличии весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН;
- увеличение на 3 дБ максимального УБЛ ДН кольцевой подрешётки при отсутствии весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН;
- увеличение на 5 дБ максимального УБЛ ДН кольцевой подрешётки при наличии весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН;
- увеличение на 2 дБ максимального УБЛ ДН цилиндрической МАР при отсутствии весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН;
- увеличение на 4 дБ максимального УБЛ ДН цилиндрической МАР при наличии весовой обработки, уменьшающей УБЛ ДН.

Расширение основного лепестка ДН (по уровню -3 дБ) в азимутальной и угломестной плоскостях для рассматриваемых решёток можно считать незначительным, поскольку оно не превышает 0.2° .

3.2. Оценка допустимых технологических разбросов установки ГМ цилиндрической МАР мобильной системы мониторинга

При оценке допустимых технологических разбросов установки элементов цилиндрической МАР будем исходить из следующих условий:



$D(\beta, \alpha)$ - ДН в угломестной плоскости; $D(\alpha, \phi)$ - ДН в азимутальной плоскости.

Рис. 7. ДН кольцевой подрешётки, относительная полоса частот 15 %, наличие весовой обработки с целью уменьшения УБЛ ДН

- сохранения необходимых характеристик направленности всей решётки – коэффициента усиления и УБЛ ДН;
- сохранения характеристик направленности каждой кольцевой подрешётки, входящей в состав цилиндрической МАР, достаточных для осуществления процедуры подавления локальных помех.

В качестве критерия сохранения необходимых характеристик направленности при изготовлении антенной решётки выберем критерий разумной достаточности, предполагающий:

- уменьшение коэффициента усиления каждой кольцевой подрешётки и цилиндрической МАР в целом за счёт технологических разбросов установки элементов не более чем на 1 дБ;
- увеличение максимального УБЛ ДН каждой из указанных решёток не более чем на 3 дБ.

Изменение характеристик направленности исследуемых решёток оценивается по отношению к соответствующим характеристикам «идеальных» антенн (без учёта технологических разбросов их изготовления) при прочих равных значениях параметров, входящих в соотношения (3) и (4).

Считая разбросы установки ГМ в решётке случайными величинами, а используемые при расчётах параметры ΔN_{ij} , ΔR_{ij} и Δn_j – случайными процессами, оценку допустимых технологических разбросов установки элементов МАР можно с достаточными основаниями производить на основе статистических характеристик.

С учётом вышеизложенного, на основе соотношений (3) и (4) были произведены расчёты характеристик направленности 24-элементной кольцевой подрешётки и 240-элементной цилиндрической МАР, которые позволили определить основные статистические характеристики параметров ΔN_{ij} , ΔR_{ij} и Δn_j , регламентирующих допустимые технологические разбросы установки ГМ цилиндрической МАР. Указанные характеристики представлены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики технологических разбросов установки ГМ цилиндрической МАР

Параметр	Характеристика	
	Максимальное отклонение, %	Среднеквадратическое отклонение, %
ΔN_{ij}	9	6
ΔR_{ij}	7	5
Δn_j	10	7

Приведённые в табл. 3 характеристики технологических разбросов получены в предположении, что реализации случайных процессов, описывающие поведение технологических допусков ΔN_{ij} , ΔR_{ij} и Δn_j , имеют математические ожидания (средние значения) существенно меньшие самих допусков. Указанное предположение соответствует случаю наличия чисто случайных погрешностей установки ГМ и отсутствию систематической составляющей погрешности.

Для удобства интерпретации полученных результатов целесообразно перейти от относительных единиц представления допустимых технологических разбросов установки ГМ в антенной решётке к абсолютным единицам измерения. В табл. 4 указаны допуски на установку ГМ цилиндрической МАР, полученные на основе среднеквадратических отклонений параметров ΔN_{ij} , ΔR_{ij} , Δn_j и выраженные в абсолютных единицах измерения (миллиметрах), применительно к трём диапазонам частот, в которых имеет смысл говорить о быстроразвёртываемых антеннах мобильных гидроакустических систем.

Таблица 4. Допуски на установку ГМ цилиндрической МАР

Вид допуска	Оценка допуска на установку ГМ МАР		
	Диапазон частот МАР		
	1.5 кГц	3.0 кГц	5.0 кГц
Межэлементное смещение (ΔN_{ij})	30 мм	15 мм	10 мм
Радиальное смещение (ΔR_{ij})	100 мм	50 мм	30 мм
Межэтажное смещение (Δn_j)	40 мм	20 мм	15 мм

Полученные оценки могут быть полезны при выборе общей конструкции цилиндрической МАР и разработке технологии её изготовления. Полученные результаты, в частности, свидетельствуют о достаточно жёстких требованиях к точности установки ГМ в решётке, которые могут быть реализованы не во всякой конструкции МАР.

Из представленных оценок, например, нетрудно заключить, что общая конструкция цилиндрической МАР должна обладать достаточной жёсткостью, которую можно обеспечить для стационарного или полустационарного вариантов исполнения решетки, но совершенно не очевидна возможность реализации МАР с такими эксплуатационными разбросами установки ГМ для быстроразвёртываемых автономных систем, где желательно обеспечивать требование минимальных габаритных размеров антенны при её транспортировке.

Следует заметить, что необеспечение требуемой точности установки элементов в конструкции антенной решётки мобильной системы влечёт за собой необходимость проведения (как при установке антенны, так и, возможно, в процессе эксплуатации) соответствующих организационных и технических мероприятий по её акустической калибровке, что, в конечном итоге, приводит к возрастанию (и весьма ощутимому) энергопотребления системы в целом.

Кроме того, необходимо отметить, что выполнение акустической калибровки антенной решётки, с требуемой точностью определения координат её элементов, – это самостоятельная инженерная задача, сопоставимая по сложности с задачей поиска необходимого конструктивно-технологического исполнения МАР быстроразвёртываемой автономной системы мониторинга и требующая отдельной технической проработки.

4. Энергетические характеристики мобильной системы мониторинга

Оценка ожидаемого энергетического выигрыша в отношении сигнал/помеха, с учётом потерь технической реализации МАР, позволяет получить необходимые данные по энергетике тракта обнаружения, которые требуются на этапе разработки для расчётов показателей эффективности системы гидроакустического мониторинга в зависимости от её конкретного назначения.

В термине отношение сигнал/помеха под сигналом понимается средняя мощность сигнала гидроакустического источника в рассматриваемой части тракта обнаружения (в данном случае на выходе одиночного ГМ или МАР в целом), а под помехой – средняя мощность суммарного воздействия помех локальных источников и изотропного шума среды в указанных местах приёмного тракта.

4.1. Обнаружение без процедуры подавления локальных помех

Энергетический выигрыш – увеличение отношения сигнал/помеха ($\mathcal{E}V_1$) за счёт использования МАР в тракте обнаружения мобильной системы мониторинга – определяется с учётом следующих четырёх составляющих:

$$\mathcal{E}V_1 (\text{дБ}) = \mathcal{E}V_{ИР} (\text{дБ}) - \mathcal{E}P_{ВО} (\text{дБ}) - \mathcal{E}P_T (\text{дБ}) - \mathcal{E}P_{Ш} (\text{дБ}), \quad (5)$$

где $\mathcal{E}V_{ИР}$ – энергетический выигрыш при использовании «идеальной» МАР;

$\mathcal{E}P_{ВО}$, $\mathcal{E}P_T$, $\mathcal{E}P_{Ш}$ – энергетические потери за счёт: весовой обработки, снижающей УБЛ ДН, технологических разбросов установки ГМ, собственных шумов устройств усиления и фильтрации ГМ.

Энергетический выигрыш при использовании «идеальной» МАР определяется зависимостью

$$\mathcal{E}B_{IP} = 10 \times \lg \frac{1 + \sum_{i=1}^P 10^{\frac{OПШ_i}{10}}}{\frac{1}{Q} + \sum_{i=1}^P 10^{\frac{OПШ_i + q_i}{10}}}, \quad (6)$$

где Q – число элементов МАР; P – количество источников локальных помех;

$OПШ_i$ – отношение средних мощностей (в дБ) i -й локальной помехи и изотропного шума на выходе одиночного ГМ;

q_i – УБЛ ДН МАР (в дБ) в направлении i -го источника локальной помехи.

Для увеличения защитного отношения МАР, с целью повышения помехозащищённости системы мониторинга, в структуру пространственно-временной обработки сигналов МАР, как правило, вводится процедура весовой обработки, уменьшающая УБЛ её ДН. При этом снижение коэффициента усиления МАР (энергетические потери $\mathcal{E}П_{BO}$) могут быть определены из соотношения:

$$\mathcal{E}П_{BO} = 10 \times \lg \frac{Mm \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^m H_i^2 C_j^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m H_i H_k C_j C_l}, \quad (7)$$

где параметры M , m , H_i , C_j охарактеризованы в соотношении (3).

Опираясь на реально полученную повторяемость и малый разброс коэффициентов передачи изготовленных УГМ, используемых при реализации цилиндрической МАР, энергетические потери за счёт собственных шумов устройств усиления и фильтрации ГМ можно оценивать исходя из следующей зависимости:

$$\mathcal{E}П_{Ш} = 10 \times \lg \left(1 + \frac{P_{УС}}{P_{МИН.СР.}} \right), \quad (8)$$

где $P_{УС}$ – средняя мощность собственных шумов усилительного тракта УГМ МАР;

$P_{МИН.СР.}$ – минимальная средняя мощность изотропных шумов среды на выходе УГМ МАР в рабочей полосе частот.

Измерения собственных шумов усилительных трактов УГМ изготовленной партии из 300 штук показали, что отношение $\frac{P_{УС}}{P_{МИН.СР.}} \leq 0.12$, а это, на основании зависимости (8),

соответствует величинам энергетических потерь $\mathcal{E}П_{Ш}$, не превышающим 0.5 дБ.

Энергетические потери $\mathcal{E}П_T$ за счёт технологических разбросов установки ГМ МАР, при надлежащем выборе её конструкции и технологии изготовления, в соответствии с допущениями, принятыми в разделе 3.2 настоящей статьи, не должны превышать 1 дБ.

Энергетические потери $\mathcal{E}П_{BO}$ за счёт весовой обработки, снижающей УБЛ ДН цилиндрической МАР, рассчитанные в соответствии с выражением (7), для H_i и C_j , обеспечивающих среднестатистические ДН, составляют около 1.5 дБ.

Таким образом, суммарные энергетические потери, снижающие эффективность «идеальной» МАР, по полученным оценкам не превышают 3 дБ.

Общий энергетический выигрыш ($\mathcal{E}V_1$) в отношении сигнал/помеха, обеспечиваемый 240-элементной МАР, оценим для случая наихудшей помеховой обстановки, когда количество источников локальных помех может достигать пяти, $ОПШ$; для всех локальных помех одинаковы, а ориентация МАР такова, что локальные помехи воздействуют по максимальным боковым лепесткам ДН решётки.

Ориентируясь на среднестатистическую ДН цилиндрической МАР, выбираем максимальные УБЛ ДН, применительно к случаю воздействия на антенну пяти локальных помех, следующими:

$$q_1 = q_2 = -12 \text{ дБ}; q_3 = q_4 = -13 \text{ дБ}; q_5 = -14 \text{ дБ}.$$

В табл.5 приведены значения энергетических выигрышей, обеспечиваемых при обнаружении в системе мониторинга за счёт использования МАР, в зависимости от параметра $ОПШ$ для случаев воздействия разного количества локальных помех, рассчитанных на основе соотношений (5) и (6).

Таблица 5. Эффективность использования МАР в условиях помех

Количество помех (P)	Энергетический выигрыш ($\mathcal{E}V_1$), дБ							
	Отношение помеха/шум ($ОПШ$), дБ							
	-30	-20	-10	-3	0	3	10	20
1	20.7	20.2	17.2	13.2	11.7	10.6	9.4	9.0
2	20.7	19.7	15.5	11.7	10.6	9.9	9.2	9.0
3	20.6	19.4	14.8	11.3	10.5	9.9	9.4	9.3
4	20.6	19.1	14.2	11.1	10.4	9.9	9.6	9.5
5	20.6	18.9	13.9	11.0	10.5	10.1	9.8	9.7

Кроме того, расчёты показывают, что максимальный энергетический выигрыш, обеспечиваемый 240-элементной МАР при отсутствии локальных помех, может составлять 20.8 дБ.

Полученные результаты позволяют сделать следующие промежуточные выводы:

– локальные помехи даже малой интенсивности существенно снижают эффективность МАР, воздействие только одной локальной помехи со средней мощностью, соизмеримой на выходе одиночного ГМ со средней мощностью изотропного шума среды, приводит к уменьшению отношения сигнал/помеха в тракте обнаружения почти на 10 дБ по сравнению с максимально возможным при отсутствии помехи;

– увеличение количества локальных помех средней и большой интенсивности не приводит к существенным изменениям эффективности МАР по сравнению со случаем воздействия одной локальной помехи, в рассматриваемой помеховой обстановке изменение величины энергетического выигрыша для $ОПШ \geq 10$ дБ не превышает 0.7 дБ при количестве источников локальных помех от 1 до 5, а сам выигрыш не превосходит значения 9.8 дБ.

Результаты расчётов позволяют также отметить, что для обеспечения требуемой эффективности МАР в составе мобильной системы мониторинга необходимо осуществлять подавление локальных помех даже малой интенсивности, соизмеримой с интенсивностью изотропного шума среды. Это, далеко не очевидное, обстоятельство обычно игнорируется при технической реализации алгоритмов подавления помех в системах различного назначения, поскольку принято считать, что подавление слабых помех технически неоправданно.

4.2. Обнаружение с подавлением локальных помех

Энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха ($\mathcal{E}B_2$), обеспечиваемый цилиндрической МАР при использовании в тракте обнаружения мобильной системы мониторинга процедуры подавления помех локальных источников, может быть охарактеризован следующими составляющими:

$$\mathcal{E}B_2(\text{дБ}) = \mathcal{E}B_{\text{ЦР}}(\text{дБ}) - \mathcal{E}P_T(\text{дБ}) - \mathcal{E}P_{\text{Ш}}(\text{дБ}), \quad (9)$$

где $\mathcal{E}B_{\text{ЦР}}$ – энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха, обеспечиваемый цилиндрической МАР, при подавлении локальных помех в каждом её парциальном канале;
 $\mathcal{E}P_T$, $\mathcal{E}P_{\text{Ш}}$ – энергетические потери реализации МАР, определённые в разделе 4.1 настоящей статьи.

Общее выражение, определяющее $\mathcal{E}B_{\text{ЦР}}$, имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}B_{\text{ЦР}} = 10 \times \lg \frac{m(1 + \text{ОПШ}_{\text{ВХ}}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sqrt{\text{ОСШК}_i \times \text{ОСШК}_j}}{\text{ОСШ}_{\text{ВХ}} \sum_{i=1}^M (1 + 2 \times \text{ОПШК}_i)}, \quad (10)$$

где параметры M , m соответствуют обозначениям, принятым в соотношении (3);

$\text{ОПШ}_{\text{ВХ}}$ – отношение средней мощности локальных помех к средней мощности изотропного шума среды на выходе одиночного ГМ МАР;

$\text{ОСШ}_{\text{ВХ}}$ – отношение средней мощности сигнала обнаруживаемого источника к средней мощности изотропного шума среды на выходе одиночного ГМ МАР;

ОСШК_i – отношение средней мощности сигнала обнаруживаемого источника к средней мощности изотропного шума среды в i -м парциальном канале МАР после процедуры компенсации локальных помех;

ОПШК_i – отношение средней мощности локальных помех к средней мощности изотропного шума среды в i -м парциальном канале МАР после процедуры компенсации локальных помех.

С учётом предложенной в [3] процедуры поэтапной компенсации помех локальных источников в парциальных каналах МАР (число этапов соответствует количеству обнаруженных источников помех) соотношение (10), для V -го этапа подавления помех, может быть преобразовано к виду:

$$\mathcal{E}B_{\text{ЦР}}(V) = 10 \times \lg \frac{m \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^P \Pi_i}{U} \right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sqrt{\frac{b(V)_i b(V)_j}{n(V)_i n(V)_j}}}{\sum_{i=1}^M \left[1 + 2 \frac{T(V)_i}{n(V)_i} \right]}, \quad (11)$$

где P – количество обнаруженных источников локальных помех;

Π_i – средняя мощность помехи i -го локального источника на выходе одиночного ГМ МАР;

U – средняя мощность изотропного шума среды на выходе одиночного ГМ МАР.

Параметры $b(V)_i$ и $n(V)_i$, входящие в соотношение (11), определяются приведёнными ниже зависимостями (12) и (13).

$$b(V)_i = b(V-1)_i - 2W(V)_i \rho_V(\gamma)_i \sqrt{b(V-1)_i G_V(\gamma)} + W(V)_i^2 G_V(\gamma), \quad (12)$$

где $b(V-1)_i = 1$ при $V = 1$;

$W(V)_i$ – оптимальный, по критерию минимума мощности локальной помехи, весовой коэффициент процедуры когерентной компенсации на V -м этапе в i -м парциальном канале кольцевой подрешётки цилиндрической МАР;

$\rho_V(\gamma)_i$ – огибающая коэффициента корреляции колебаний i -го парциального канала кольцевой подрешётки и колебаний компенсационного тракта приёма локальной помехи на V -м этапе процедуры подавления локальных помех;

γ – азимут обнаруживаемого гидроакустического источника;

$G_V(\gamma)$ – средняя мощность колебаний обнаруживаемого источника на выходе компенсационного тракта кольцевой подрешётки для ДН, формируемой на V -м этапе процедуры подавления локальных помех.

$$n(V)_i = n(V-1)_i + W(V)_i^2 \sum_{j=1}^M H(V)_j^2, \quad (13)$$

где $n(V-1)_i = 1$ при $V = 1$;

$H(V)_j$ – весовые коэффициенты, минимизирующие УБЛ ДН в азимутальной плоскости кольцевой подрешётки компенсационного тракта на V -м этапе процедуры подавления локальных помех.

Параметр $G_V(\alpha)$, характеризующий среднюю мощность колебаний гидроакустического источника, действующего с направления α , на выходе кольцевой подрешётки, сфазированной в азимутальной плоскости в направлении β_V на V -м этапе процедуры подавления локальных помех, определяется выражением

$$G_V(\alpha) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H(V)_i H(V)_j \frac{\sin \left[\frac{1}{2} \Phi N M \Gamma_{ij}(\alpha, \beta_V) \right]}{\frac{1}{2} \Phi N M \Gamma_{ij}(\alpha, \beta_V)} \cos \left[N M \Gamma_{ij}(\alpha, \beta_V) \right], \quad (14)$$

где $\Gamma_{ij}(\alpha, \beta_V) = \cos \left(\eta_i - \frac{\pi \beta_V}{180} \right) - \cos \left(\eta_j - \frac{\pi \beta_V}{180} \right) - \psi_i \cos \left(\gamma_i - \frac{\pi \alpha}{180} \right) + \psi_j \cos \left(\gamma_j - \frac{\pi \alpha}{180} \right)$;

$$\psi_i = 1 + \Delta R_i; \quad \eta_i = \frac{2\pi(i-1)}{M}; \quad \gamma_i = \frac{2\pi(i-1 + \Delta N_i)}{M};$$

параметры $\Phi, N, \Delta R_i, \Delta N_i$ кольцевой подрешётки были определены в соотношении (3).

Огибающая коэффициента корреляции колебаний L -го парциального канала подрешётки от гидроакустического источника с азимутом α и колебаний на выходе кольцевой подрешётки, сфазированной в азимутальном направлении β_V на V -м этапе процедуры подавления локальных помех, описывается соотношением

$$\rho_V(\alpha)_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H(V)_i H(V)_j \frac{\sin\left[\frac{1}{2}\Phi N M \Gamma_{Li}(\alpha, \beta_V)\right] \sin\left[\frac{1}{2}\Phi N M \Gamma_{Lj}(\alpha, \beta_V)\right]}{\frac{1}{2}\Phi N M \Gamma_{Li}(\alpha, \beta_V) \frac{1}{2}\Phi N M \Gamma_{Lj}(\alpha, \beta_V)} \cos\left[N M \Gamma_{ij}(\alpha, \beta_V)\right]}{G_V(\alpha)}}. \quad (15)$$

Оптимальный весовой коэффициент, соответствующий минимальной эффективности (оценке снизу) процедуры когерентной компенсации в i -м парциальном канале кольцевой подрешётки на V -м этапе, определяется зависимостью

$$W(V)_i = Z(V)_{11} \left[C \rho_V(\gamma)_i \sqrt{b(V-1)_i G_V(\gamma)} + \sum_{j=1}^P \Pi_j \rho_V(\beta_j + \Delta_j)_i \sqrt{k(V-1)_i l_{(V-1)ji} G_V(\beta_j + \Delta_j)} \right], \quad (16)$$

где $k(0)_i = 1$; $\Delta_j = 0$ для $j \neq V$; $k(V-1)_i = 1$ для $(V-1) \neq j$; $l_{(V-1)ji} = 1$ для $(V-1) = j$.

$$k(V)_i = l_{(V-1)Vi} - 2W(V)_i \rho_V(\beta_V + \Delta_V)_i \sqrt{l_{(V-1)Vi} G_V(\beta_V + \Delta_V)} + W(V)_i^2 G_V(\beta_V + \Delta_V),$$

при этом $l_{(V-1)Vi} = 1$ для $V = 1$.

$$l_{Vji} = k(V-1)_i l_{(V-1)ji} - 2W(V)_i \rho_V(\beta_j)_i \sqrt{k(V-1)_i l_{(V-1)ji} G_V(\beta_j)} + W(V)_i^2 G_V(\beta_j),$$

при этом

$$V \neq j; k(V-1)_i, l_{(V-1)ji} = 1 \text{ для } V = 1; l_{(V-1)ji} = 1 \text{ для } (V-1) = j; k(V-1)_i = 1 \text{ для } (V-1) \neq j.$$

$Z(V)_{11}$ - элемент матрицы $\|Z(V)\|$;

$$\|Z(V)\| = \begin{vmatrix} \sum_{j=1}^P \Pi_j G_V(\beta_j + \Delta_j) + U \sum_{i=1}^M H(V)_i^2 + C G_V(\gamma) & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^P \Pi_j G_V(\beta_j + \Delta_j) + U \sum_{i=1}^M H(V)_i^2 + C G_V(\gamma) \end{vmatrix}^{-1};$$

C - средняя мощность колебаний обнаруживаемого источника на выходе одиночного ГМ подрешётки;

β_j - азимут (в градусах) j -го источника локальной помехи;

Δ_j - погрешность определения (в градусах) азимута j -го источника локальной помехи.

Средняя мощность суммарных колебаний от P источников локальных помех в i -м парциальном канале каждой кольцевой подрешётки на V -м этапе процедуры подавления локальных помех оценивается зависимостью

$$T(V)_i = \sum_{j=1}^P \Pi_j k(V)_i l_{Vji}, \quad (17)$$

где $k(V)_i = 1$ для $j \neq V$; $l_{Vji} = 1$ для $j = V$.

Для количественной оценки эффективности аналитически описанной процедуры подавления локальных помех сравним энергетические выигрыши, обеспечиваемые цилиндрической МАР, в условиях воздействия одной и нескольких помех локальных источников. При расчётах эффективности использования МАР в системе мониторинга будем исходить из следующих практически целесообразных предпосылок:

- кольцевые подрешётки МАР имеют среднестатистические ДН с технологическими разбросами установки ГМ, представленными в табл. 3;

- в МАР используются УГМ с относительной полосой частот, равной 0.4;
- погрешности пеленгования источников локальных помех не превышают 1.5° ;
- пространственное местоположение источников локальных помех таково, что они воздействуют по максимальным боковым лепесткам ДН подрешётки компенсационного тракта – случай наиболее неблагоприятной помеховой обстановки.

В табл. 6 приведены значения энергетических выигрышей в отношении сигнал/помеха, рассчитанные с использованием соотношений (9) – (17), для 240-элементной цилиндрической МАР и случая воздействия одной локальной помехи при различных соотношениях параметров $ОСШ_{ВХ}$ и $ОПШ_{ВХ}$.

В табл. 7 представлены аналогичные табл. 6 характеристики, но для случая воздействия пяти локальных помех одинаковой средней мощности (параметры $П_1 = П_2 = П_3 = П_4 = П_5$).

Таблица 6. Эффективность использования МАР, воздействие одной локальной помехи

Отношение сигнал/шум ($ОСШ_{ВХ}$), дБ	Энергетический выигрыш ($ЭВ_2$), дБ									
	Отношение помеха/шум ($ОПШ_{ВХ}$), дБ									
	–3	0	4	7	10	17	27	37	47	57
–30	22.8	23.9	26.3	28.6	31.3	37.9	47.8	57.8	67.8	77.8
–20	22.8	23.9	26.3	28.6	31.3	37.9	47.8	57.8	67.8	77.8
–10	22.7	23.9	26.3	28.6	31.3	37.9	47.8	57.8	67.8	77.8
0	22.5	23.8	26.3	28.6	31.3	37.9	47.8	57.8	67.8	77.8
10	21.6	23.1	25.9	28.4	31.1	37.9	47.8	57.8	67.8	77.8
20	21.1	22.4	25.0	27.6	30.5	37.7	47.8	57.8	67.8	77.8
30	21.0	22.3	24.7	27.1	29.8	36.8	47.6	57.8	67.8	77.8

Таблица 7. Эффективность использования МАР, воздействие пяти локальных помех одинаковой интенсивности

Отношение сигнал/шум ($ОСШ_{ВХ}$), дБ	Энергетический выигрыш ($ЭВ_2$), дБ									
	Отношение помеха/шум ($ОПШ_{ВХ}$), дБ									
	–3	0	4	7	10	17	27	37	47	57
–30	20.5	21.1	23.1	25.2	27.7	34.3	44.2	54.1	64.1	73.6
–20	20.5	21.1	23.0	25.2	27.7	34.3	44.2	54.1	64.1	73.6
–10	20.3	21.0	23.0	25.2	27.7	34.3	44.2	54.1	64.1	73.6
0	18.5	19.9	22.5	24.9	27.5	34.2	44.2	54.1	64.1	73.6
10	13.7	15.7	19.5	22.9	26.3	34.0	44.1	54.1	64.1	73.6
20	11.9	13.3	16.1	19.0	22.5	32.0	43.8	54.1	64.1	73.6
30	11.7	13.0	15.5	17.9	20.6	28.2	41.8	53.8	64.1	73.6

Табл. 8 отражает эффективность использования цилиндрической МАР в случае воздействия пяти помех разной интенсивности (параметры $П_2 = \frac{П_1}{2}$, $П_3 = \frac{П_2}{2}$, $П_4 = \frac{П_3}{2}$, $П_5 = \frac{П_4}{2}$) при одинаковой, по сравнению с предыдущим случаем, суммарной средней мощности помех на выходах одиночных ГМ МАР.

Таблица 8. Эффективность использования МАР, воздействие пяти локальных помех разной интенсивности

Отношение сигнал/шум ($ОСШ_{ВХ}$), дБ	Энергетический выигрыш ($ЭВ_2$), дБ									
	Отношение помеха/шум ($ОПШ_{ВХ}$), дБ									
	-3	0	4	7	10	17	27	37	47	57
-30	21.3	22.1	24.4	26.1	28.6	35.1	45.0	55.0	65.0	74.7
-20	21.3	22.1	24.4	26.1	28.6	35.1	45.0	55.0	65.0	74.7
-10	21.0	21.8	24.3	26.0	28.6	35.1	45.0	55.0	65.0	74.7
0	18.6	20.1	23.1	25.5	28.2	35.0	45.0	55.0	65.0	74.7
10	13.5	15.6	18.6	22.4	26.1	34.4	44.9	55.0	65.0	74.7
20	11.9	13.2	15.9	18.7	22.0	31.4	44.3	54.9	65.0	74.7
30	11.7	12.9	15.3	17.8	20.5	27.1	41.3	54.3	64.9	74.7

Анализ приведённых в табл. 5 – 8 энергетических характеристик позволяет сделать следующие выводы.

Использование процедуры подавления локальных помех в мобильной системе гидроакустического мониторинга с цилиндрической МАР позволяет при малых отношениях сигнал/шум ($ОСШ_{ВХ} \leq 1$) увеличить отношение сигнал/помеха на 10 – 18 дБ в условиях помех малой интенсивности ($ОПШ_{ВХ} = 0 - 10$ дБ), на 18 – 34 дБ в условиях помех средней интенсивности ($ОПШ_{ВХ} = 10 - 27$ дБ) и на 34 – 64 дБ в условиях локальных помех большой интенсивности ($ОПШ_{ВХ} = 27 - 57$ дБ).

Эффективность процедуры подавления локальных помех при больших отношениях сигнал/шум ($ОСШ_{ВХ} > 1$) может и уменьшаться. Это заметно проявляется только в условиях воздействия нескольких помех малой и средней интенсивности. Так, например, максимальное снижение величины энергетического выигрыша (при $ОСШ_{ВХ} = 30$ дБ) в условиях помех малой интенсивности может достигать 9 дБ, а в условиях помех средней интенсивности составляет 3.7 дБ. Эффективность рассмотренной процедуры подавления локальных помех практически не зависит от отношения сигнал/шум только в случае воздействия помехи одного локального источника.

Эффективность процедуры подавления локальных помех не зависит от отношения сигнал/шум при любом количестве помех только в условиях помех очень большой интенсивности ($ОПШ_{ВХ} \geq 47$ дБ).

Энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха при подавлении нескольких помех одинаковой и разной интенсивности примерно одинаков (отличия не более 1.1 дБ), что свидетельствует о достаточно высокой эффективности процедуры когерентной компенсации.

Энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха при подавлении одной помехи на 2 – 4 дБ больше, чем выигрыш в случае подавления нескольких (в данном случае пяти) помех. Это особенно заметно при подавлении помех большой интенсивности.

5. Заключение

Эффективность мобильной системы гидроакустического мониторинга с 240-элементной цилиндрической МАР характеризуется следующими количественными показателями.

В условиях воздействия локальных помех разной интенсивности энергетические потери в системе за счёт технологического разброса передаточных характеристик частотных фильтров ГМ МАР имеют следующую тенденцию:

- в условиях помех малой интенсивности потери составляют доли дБ, а эффективность системы по подавлению помех приближается к максимально возможной;
- в условиях помех средней интенсивности потери могут достигать величины 6 дБ, при этом максимально возможное подавление помех в системе составляет не более 27 дБ;
- в условиях помех большой интенсивности потери возрастают пропорционально их интенсивности и ограничивают эффективность системы по подавлению помех величиной 30 дБ.

Расчёты на основе аналитической модели цилиндрической МАР свидетельствуют:

- влияние технологических разбросов установки ГМ в МАР проявляется, главным образом, в уменьшении коэффициента усиления решётки и изменении структуры и уровня боковых лепестков её ДН;
- требуются жёсткие допуски на установку ГМ МАР, например, в диапазоне частот 3 кГц они составляют: межэлементное смещение – 15 мм, радиальное смещение – 50 мм, межэтажное смещение – 20 мм. Полученные оценки могут быть полезны при выборе общей конструкции МАР и разработке технологии её изготовления.

Оценки эффективности системы с учётом реальных передаточных характеристик изготовленных частотных фильтров ГМ МАР показали:

- максимальный энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха, обеспечиваемый использованием МАР при отсутствии локальных помех, может составлять 20.8 дБ;
- наличие локальных помех средней интенсивности снижает энергетический выигрыш системы до величины 9.8 дБ;
- локальные помехи с мощностью, соизмеримой со средней мощностью изотропного шума среды, приводят к уменьшению отношения сигнал/помеха в тракте обнаружения системы почти на 10 дБ;
- использование процедуры подавления локальных помех в системе мониторинга позволяет при малых отношениях сигнал/шум увеличить отношение сигнал/помеха на 10 – 18 дБ в условиях помех малой интенсивности, на 18 – 34 дБ в условиях помех средней интенсивности и на 34-64 дБ в условиях помех большой интенсивности;
- энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха при подавлении одной помехи на 2 – 4 дБ больше, чем выигрыш в случае подавления пяти помех;
- эффективность процедуры подавления локальных помех очень слабо зависит от отношения сигнал/шум только в случае воздействия помехи одного локального источника;
- эффективность процедуры подавления локальных помех не зависит от отношения сигнал/шум при любом количестве помех только в условиях помех очень большой интенсивности.

Литература

1. Адаптивные антенные решётки: Пер. с англ. // Монзинго Р. А., Миллер Т. У. М.: Радио и связь, 1986, 448 с.
2. Применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. // Под редакцией Э. Оппенгейма. М.: Мир, 1980, 550 с.

3. Арсентьев В. Г. Подавление локальных помех в пространственно-многоканальных системах обнаружения // Вестник СибГУТИ, №1, 2010, с. 13 – 32.
4. Зелкин Е. Г., Соколов В. Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решётки и антенны с непрерывным раскрытием. М.: Сов. радио, 1980, 296 с.

Статья поступила в редакцию 28.05.2010

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., проректор по инновационному развитию СибГУТИ
тел. (383) 269-82-05, e-mail: vigar@sibsutis.ru

The effectiveness of mobile system of hydroacoustic monitoring

V.G. Arsentiev

The problem of evaluating the effectiveness of mobile hydroacoustic monitoring system is considered under the impact of local interference with the actual design and technological characteristics of multielement antenna array.

Keywords: cylindrical antenna array, the directivity pattern, coherent interference compensation, the energy characteristics of the system.