

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА СИГНАЛОВ

Введение

В настоящее время в мире и в Украине существует дефицит использования частотного, временного и кодового ресурсов и остро ощутима необходимость в использовании дополнительных физических ресурсов, реализующих повышение эффективности использования радиочастотного ресурса, повышение пропускной способности каналов связи и увеличения продуктивности работы системы мобильной связи в целом [1 – 3]. В данном аспекте перспективно использование методов пространственно-временного доступа (ПВД) в системах мобильной связи [4].

Основной проблематикой в задачах ПВД с использованием адаптивных антенных решеток (АР) является задача определения направления прихода сигналов от мобильных абонентских станций (АС). Данная задача решается на основе разных методов: пеленгации с использованием равносигнальной зоны, оценок характеристик направленности АР, с релейским разрешением, со сверхразрешением (СР) и др. обладающих своей эффективностью [5, 6].

Методы оценки направления прихода сигналов (DOA – Direction of arrival estimation) лежат в основе многих задач телекоммуникаций. Анализ данных методов, с точки зрения их эффективности и реализуемости, является в достаточной степени актуальной задачей при решении задач ПВД в системах мобильной связи.

Проблема определения направления прихода электромагнитной волны имеет как самостоятельное значение (пеленгование источников радиоизлучений), так и является составным компонентом более общих задач радиосвязи, радиолокации, навигации и др. [7].

В рамках исследуемой проблематики автором проводится оценка теоретической предельной разрешающей способности некоторых методов сверхразрешения. На основе моделирования различных сценариев сигнально-помеховой обстановки получены значения теоретической предельной точности рассматриваемых методов.

Материалы и методы

При реализации методов сверхразрешения в пространственной области удастся определить положение спектральных составляющих (направлений прихода), анализируемых (принимаемых) сигналов. В работах Джонсона, Кейпона и др. [8, 9] на основе методов нелинейного спектрального анализа были разработаны методы сверхразрешения сигналов, разнесенных на сколь угодно малое расстояние.

Имеется большое число алгоритмов, реализующих метод сверхразрешения (СР). К числу таких относятся [5]:

1) методы, основанные на определении положений локальных максимумов псевдоспектра $D(\theta)$ на сканирование по пространству: Кейпона, “теплового шума”, Борджоти – Лагунаса;

2) методы, основанные на разложении пространственной корреляционной матрицы R по собственным векторам V_k и k – собственным значениям – метод MUSIC, EV (eigenvector);

3) методы, основанные на разделении сигнального и шумового пространств. К числу таких относятся методы ROOT-MUSIC и ESPRIT, ориентированные на использование линейных эквивалентных АР.

В табл. 1 представлена обобщенная сравнительная характеристика наиболее популярных методов оценки направления углового сверхразрешения сигналов.

Таблица 1

№	Метод оценки направления прихода сигналов	Достоинства	Ограничения и недостатки метода
1	<p>Классический метод формирования луча (метод Бартлетта или метод задержек – расширение спектрального анализа по Фурье), [10]:</p> $D_F(\theta) = \frac{\vec{a}(\theta)^H R_{xx} \vec{a}(\theta)}{\vec{a}^H(\theta) \vec{a}(\theta)},$ <p>$\vec{v}(\theta)$ – вектор отклика АР, т.е. фактически столбцы весовых коэффициентов для всех углов прихода сигналов.</p>	Простая реализация	<p>Метод основан на сканировании лучом АР в пространстве и определении максимума уровня излучения.</p> <p>Низкая разрешающая способность, определяемая шириной основного луча АР и уровней боковых лепестков</p> <p>Разрешающая способность зависит от ширины основного луча АР и связана с ограничением релейского разрешения.</p> <p>Недостаток может быть смягчен увеличением количества элементов АР.</p> <p>Увеличение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения.</p>
2	<p>Алгоритмы линейного предсказания (алгоритм авторегрессионной модели или метод максимума энтропии (ММЭ)), [11]:</p> $D_{ММЭ}(\theta) = R_{11}^{-1} / \vec{a}(\theta)^H R_1^{-1} ^2.$ <p>Применимость к анализу временных рядов (временного спектра). Ограничение использования к оценке пространственного спектра линейная эквидистантная решетка с равномерным амплитудным распределением.</p>	Возможность применения в АР с нерегулярной структурой размещения АЭ.	<p>Сложность корректной оценки необходимого порядка авторегрессионной модели – длины фильтра (длины вектора R_{11}^{-1}).</p> <p>При малой длине фильтра спектр получается сглаженным, но с плохим разрешением, а сверхбольшая длина фильтра предсказания, при хорошем разрешении, приводит к сильно флуктуирующему спектру – высоким уровнем боковых лепестков случайного характера.</p>
3	<p>Метод Кейпона (Minimum variance method (MVDL) – метод минимального отклонения или наименьшей вариации (дисперсии)), [9]:</p> $D_c(\theta) = 1 / (\vec{a}(\theta)^H R^{-1} \vec{a}(\theta))$	Применим к АР любой конфигурации (одно-, двух-, трехмерным, регулярным и нерегулярным АР). Повышение разрешающей способности в сравнении с методом Фурье	<p>Необходимость в большом количестве обучающих выборок (вдвое больше, чем число элементов решетки), что увеличивает объем вычислительных операций. Слабая эффективность метода при малых объемах выборки и исходных данных.</p> <p>Невозможность пеленгации сигналов сильно коррелированных источников.</p>

3	<p>Метод Кейпона (Minimum variance method (MVDL) – метод минимального отклонения или наименьшей вариации (дисперсии)), [9]:</p> $D_c(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-1} \bar{a}(\theta))$		<p>Количество элементов АР не накладывает ограничений на разрешающую способность. Разрешающая способность растет неограничено при увеличении соотношения сигнал/шум и объема выборки.</p>
4	<p>Алгоритм теплового шума (Thermal Noise Algorithm (TNA)), [12]:</p> $D_{TNA}(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-2} \bar{a}(\theta)).$ <p>При использовании высоких степеней обратной корреляционной матрицы получаем алгоритм высокого разрешения:</p> $D(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-k} \bar{a}(\theta)), k > 2$	<p>При идеальных условиях (без учета технических характеристик и погрешностей аппаратуры) возрастает разрешающая способность по сравнению с методом Кейпона.</p>	<p>С ростом степени k реальная разрешающая способность остается неизменной, но существенно возрастает вычислительная сложность.</p>
5	<p>Метод Борджотти-Лагунаса, [13]:</p> $D_{BL}(\theta) = \frac{D_c}{D_{TNA}} = \frac{\bar{a}(\theta)^H R^{-1} \bar{a}(\theta)}{\bar{a}(\theta)^H R^{-2} \bar{a}(\theta)}.$	<p>Относится к группе алгоритмов на основе оценки параметров теплового шума.</p>	<p>Нормировка отношения сигнал/шум на выходе АР мощностью теплового шума.</p>
6	<p>Метод MUSIC (Multiple signal classification – метод многосигнальной классификации), [14]:</p> $D_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H \left(\sum_{k=M+1}^R Q_k \cdot Q_k^H \right) \bar{a}(\theta)},$ <p>где Q_k – собственные векторы корреляционной матрицы R; M – число источников излучения.</p>	<p>Большая разрешающая способность в сравнении с методом Кейпона. Метод эффективен, когда соотношение сигнал/шум и количество элементов АР стремятся к бесконечности. Применим к АР любой конфигурации.</p>	<p>Метод MUSIC является предельным случаем Кейпона при стремящемся к бесконечности отношении сигнал/шум. Необходимость предварительной оценки размерности сигнального и шумового подпространств. Критичен к неопределенностям параметров математической модели и к величине соотношения сигнал/шум, когда источники близкорасположены. Большая вычислительная сложность метода, определяемая вычислением сингулярного разложения ковариационной матрицы выходов элементов АР. Метод не дает результатов для коррелированных источников сигналов. Root-MUSIC позволяет осуществлять пеленгацию когерентных сигналов.</p>

На основе анализа табл. 1 представляет интерес получения оценок разрешающей способности представленных методов углового сверхразрешения в зависимости от числа входящих сигналов с различных направлений, значения отношения сигнал/(помеха+шум) (SNR), корреляции сигналов и их количества, числа элементов антенной решетки.

Исследование методов оценки направления прихода сигналов со сверхразрешением

Проведем исследование методов оценки направления прихода сигналов со сверхразрешением восьмиэлементной эквидистантной линейной антенной решетки на основе имитационного моделирования в пакете математического моделирования MatLab13.x. Для получения адекватных количественных и качественных оценок теоретической предельной точности методов использовались значения параметров близкие к границе устойчивости методов, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Значение							
Сценарий моделирования 1								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов AP	4							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π				
Углы прихода сигналов, β	-20^0	-10^0	0^0	30^0				
Сценарий моделирования 2								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов AP	4							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$							
Углы прихода сигналов, β	-20^0	-10^0	0^0	30^0				
Сценарий моделирования 3								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов AP	50							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π				
Углы прихода сигналов, β	-20^0	-10^0	0^0	30^0				
Сценарий моделирования 4								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов AP	4	10	50	100				
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π				
Углы прихода сигналов, β	-20^0	-10^0	0^0	30^0				
Сценарий моделирования 5								
Количество анализируемых сигналов	8							
Количество антенных элементов AP	10;50							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0							
Фаза сигнала,	$\pi/8$	$\pi/4$	$3\pi/8$	$\pi/2$	$5\pi/8$	$3\pi/4$	$7\pi/8$	π
Углы прихода сигналов, β	-15^0	-35^0	-55^0	80^0	15^0	35^0	55^0	80^0

В основе анализа методов сверхразрешения рассматривались методы: неадаптивного формирования луча (НФЛ), Кейпона, теплового шума, Борджотти – Лагунаса, максимальной энтропии (ММЭ), многосигнальной классификации (MUSIC). Получение оценок разрешающей способности методов углового сверхразрешения сигналов по предложенной методике основывается на моделировании пяти сценариев сигнально-помеховой обстановки при вариации различных параметров.

Целью задачи оценки методов углового сверхразрешения сигналов является определение угловых координат источников излучения при наблюдении M -выборок данных с выходов восьми антенных элементов эквидистантной линейной АР и сравнительный анализ методов по критерию разрешающей способности.

В рамках данного исследования используем ряд допущений:

- известно число оцениваемых сигналов (это позволяет выбрать число обучающих выборок равным оптимальному и тем самым избежать дополнительных потерь);
- число оцениваемых сигналов не превышает числа антенных элементов (в противном случае получаем вырожденные оценки);
- сигналы являются неизвестными детерминированными функциями (что является характерным для систем связи);
- набор из N любых направляющих векторов является линейно независимым (решетчатое множество АР является однозначным, только в случае если любое множество однозначных направляющих векторов N , формирующих это решетчатое множество в многосвязной области образует линейно независимое множество, при $N \leq M$, где M количество АЭ) [10];
- в полосе обработки в качестве шума используется гауссовый белый шум, некоррелированный во всех пространственных каналах с одинаковой мощностью (дополнительная оценка параметров шума существенно усложняет задачу оценивания направления прихода сигналов).

В случае непринятия в расчет используемых допущений аналитическая модель оценки весового вектора АР значительно усложняется в связи с увеличением количества параметров определяющих априорную информацию о наблюдаемых процессах АР. При этом существенно возрастает вычислительная сложность, что делает модель данных практически нереализуемой.

Результаты моделирования оценок разрешающей способности методов углового сверхразрешения

Сценарий 1. Рассматриваются некоррелированные сигналы от четырех точечных источников излучения с углами прихода: $-20^{\circ}, -10^{\circ}, 0^{\circ}, 30^{\circ}$ и фазой: $\pi/4, \pi/3, \pi/2$ и π (табл. 2). Количество элементов АР – 10, расстояние между АЭ – $d = \lambda/2$. Соотношение сигнал/шум: 0; 20 дБ. На рис. 1 *а, б* представлены графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов методов сверхразрешения: *а* – SNR= 0 дБ; *б* – SNR= 20 дБ. Из анализа графиков рис. 1, *а* следует, что неадаптивный метод формирования луча (по Фурье) не дает возможности пространственного разделения сигналов, как можно видеть, три из четырех сигналов находятся в одном элементе разрешения. Остальные методы обладают более высокими характеристиками разрешения сигналов и позволяют оценивать углы прихода данных сигналов с различной точностью. Как можно видеть, наиболее высокоточным является метод ММЭ, вместе с тем, в спектре присутствуют ложные пики. Из рассматриваемого набора методов только методы MUSIC и ММЭ обеспечивают получение максимума мощностей прихода сигналов с рассматриваемых направлений. С увеличением SNR до 20 дБ (рис. 1, *б*) значительно повышается разрешающая способность методов за исключением методов Борджотти – Лагунаса и классического НФМ.

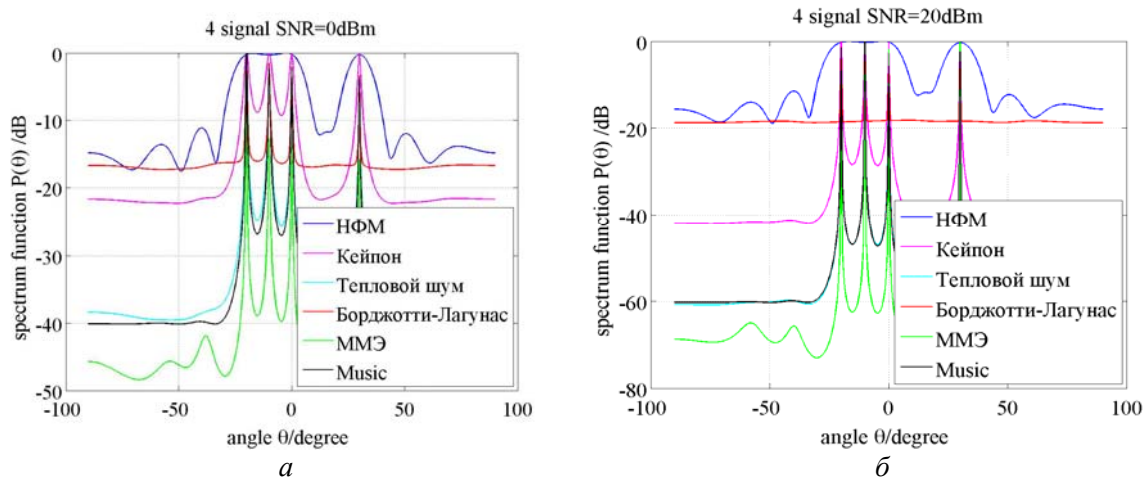


Рис. 1

Сценарий 2. Сценарий предусматривает прием четырех коррелированных сигналов с фазой $\pi/4$. На рис. 2, *a – б* показаны графики зависимости мощности излучения от угла прихода коррелированных сигналов методов сверхразрешения: *a – SNR= 0 дБ; б – SNR= 20 дБ*. Как видно из полученных результатов, представленных на рис. 2, *a, б*, практически все методы не справляются с задачей оценки пространственного разделения источников излучения при соотношении *SNR 0 дБ*. С увеличением соотношения *SNR* до 20дБ наилучший результат обеспечивает метод ММЭ.

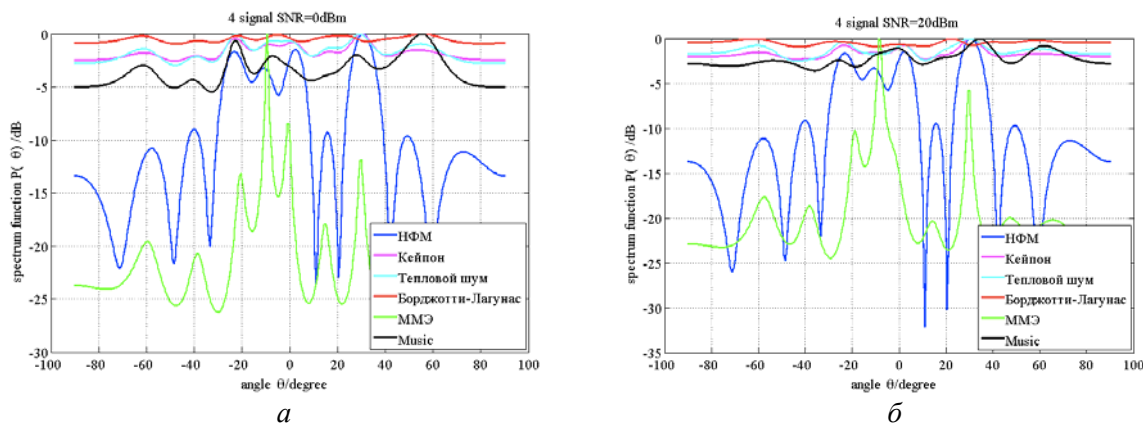


Рис. 2

Сценарий 3. Рассмотрим вариант использования АР с количеством элементов 50. На рис. 3, *a, б* представлены графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов методов сверхразрешения с количеством элементов АР $N = 50$: *a – SNR= 0 дБ; б – SNR= 20 дБ*. Как можно видеть из анализа полученных зависимостей (рис. 3, *a*), метод ММЭ при оценке пространственного излучения источников дает ложные пики, что в целом ухудшает его характеристики независимо от соотношения *SNR* (рис. 3, *б*). Наибольшей точностью характеризуются методы MUSIC и Кейпона. Уменьшение и увеличение соотношения *SNR* заметно не сказывается на разрешающей способности методов.

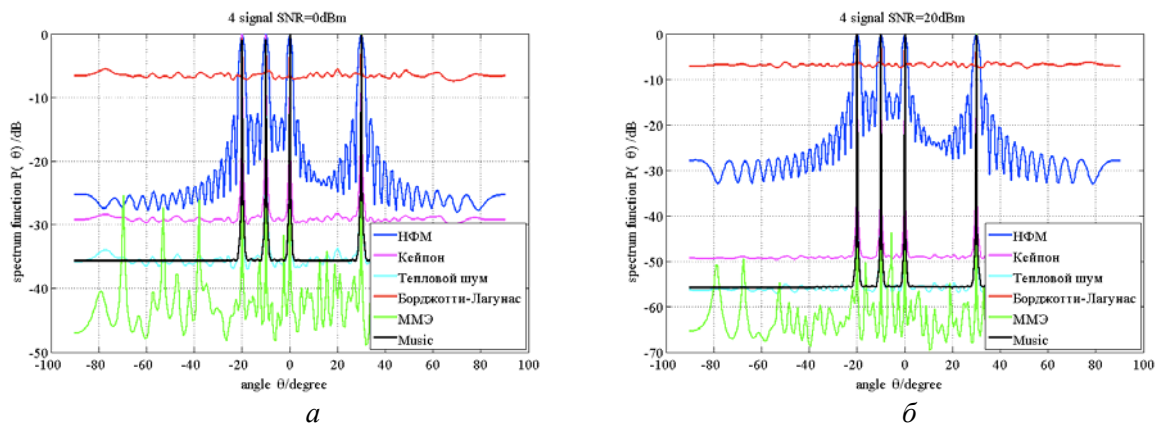


Рис. 3

Сценарий 4. Проанализируем разрешающую способность методов сверхразрешения при использовании АР с количеством АЭ: 4;10;50;100 при $SNR = 0$ дБ (рис. 4, а – е). Характер зависимостей показывает, что разрешающая способность оценки направления прихода сигналов для каждого из рассматриваемых методов существенно может быть увеличена при увеличении количества АЭ.

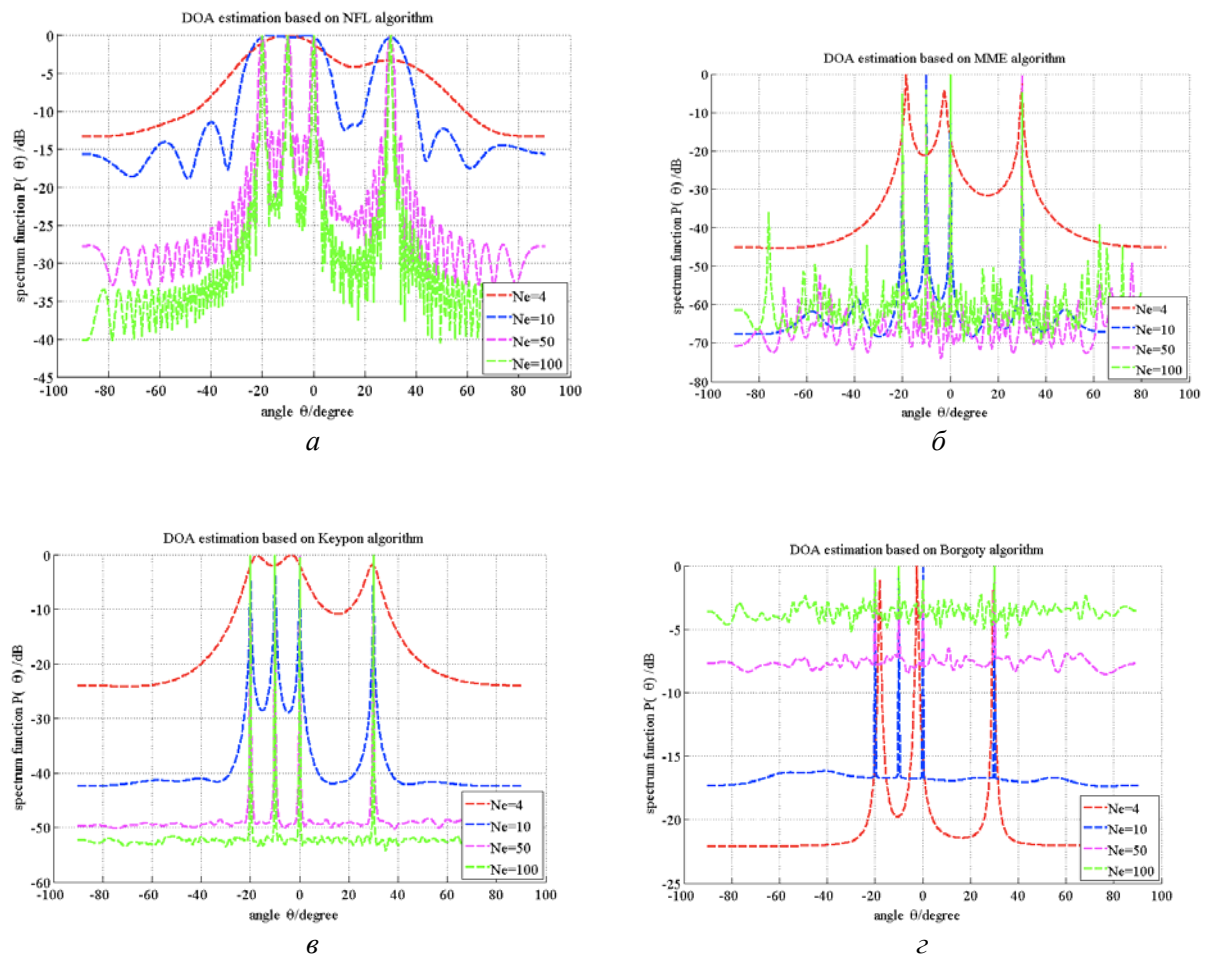


Рис. 4

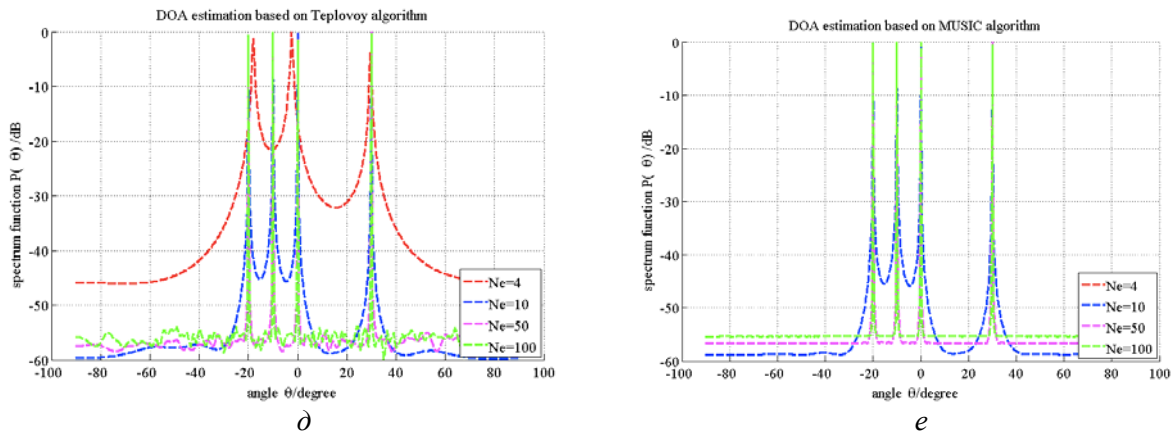


Рис. 4 (Продолжение)

Сценарий 5. На рис. 5, *a – в* представлены результаты оценок направления прихода восьми сигналов с различными фазами и углами прихода при использовании АЭ с 10 (рис. 5, *a*) и 50 АЭ (рис. 5, *б*, табл. 2). Как можно видеть из характера зависимостей, представленных на рис. 5, *a, б*, ключевым параметром, влияющим на разрешающую способность, является значение соотношения числа оцениваемых сигналов и числа АЭ. Из анализа зависимостей на рис. 5, *a* можно видеть, что при количестве антенных элементов равном 10 корреляционная матрица вырождается и ни один из методов не обеспечивает пространственное разделение сигналов, поскольку количество сигналов превышает сумму среднего количества антенных элементов и ранга корреляционной матрицы ($N > \frac{N + \text{rank}\{R_{xx}\}}{2}$) [12].

Несколько улучшить результат пространственного оценивания прихода сигналов получается путем увеличения числа АЭ до 50, и как можно видеть из рис. 5, *б*, стабильно высокий результат при значениях $SNR = 0$ дБ дает метод MUSIC.

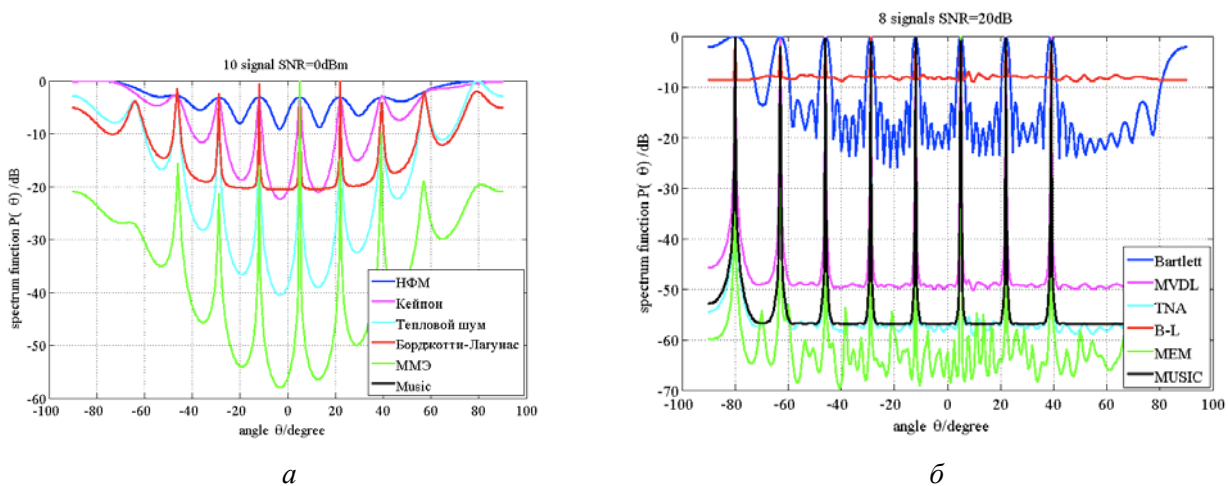


Рис. 5

Стоит отметить, что полученные результаты оценок пространственного разрешения рассматриваемых методов являются потенциально достижимыми в рамках указанных допущений методики анализа.

Выводы

Анализ полученных результатов проведенного имитационного моделирования по оценке пространственного разрешения углов прихода сигналов от четырех источников излучения показал:

1. Классический неадаптивный метод формирования луча является самым простым в реализации на практике, однако имеет существенный недостаток, связанный с ограничением релейского разрешения [9]. Как показывает анализ зависимостей на рис. 4, *а*, данный недостаток может быть смягчен только увеличением количества АЭ. Улучшение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения (рис. 1, *а*, *б*).

2. Оценка пространственного разрешения источников по методу Кэйпона превосходит классический метод формирования луча, поскольку он использует каждую доступную степень свободы для концентрации полученной энергии вдоль направления интересующего пеленга. Существующая минимизация мощности может быть интерпретирована как ограничение некоторой способностью подавления шума для более сфокусированного формирования нуля в направлениях присутствия других источников сигнала. При этом уменьшается спектральное рассеивание с близко расположенных источников, хотя разрешающая способность формирования ДН антенны по Кэйпону зависит от соотношения сигнал-шум (рис. 1, *а*, *б*) и от апертуры АС (рис. 4, *в*).

3. Среди непараметрических методов непрерывного анализа: “теплого шума”, Борджотти – Лагунаса метод Кейпона обладает самой низкой разрешающей способностью (рис. 1, *а*). Вместе с тем, при увеличении числа АЭ, что увеличивает конечную длину выборки, на фоне случайных амплитудно-фазовых ошибок в каналах приема методы Борджотти – Лагунаса и “теплого шума” могут терять свое преимущество над алгоритмом Кейпона (рис. 3, *б*).

4. Метод многосигнальной классификации MUSIC является предельным случаем метода Кейпона при соотношении сигнал/шум, стремящемся к бесконечности, что согласуется с более высокой разрешающей способностью MUSIC по сравнению с алгоритмом Кейпона. Анализируя приведенные графики рис. 1, *а*, *б*, приходим к выводу, что метод MUSIC способен обеспечить разрешение независимо от соотношения сигнал-шум входящих сигналов при достаточном угловом разнесении источников. Вместе с тем, из анализа работ [6, 9, 11] известно, что метод MUSIC критичен к неопределенностям параметров математической модели, а также к величине соотношения сигнал/шум в случае, когда источники имеют близкие по значению пеленги. Как видно из графиков, представленных на рис. 2, *а*, *б*, метод MUSIC предполагает некоррелированность сигналов источников между собой, что в реальных условиях многолучевого излучения далеко не всегда выполнимо. Если достаточно велико значение отношения сигнал-шум и время сбора данных, а модель сигнала достаточно точная, метод MUSIC дает статистически состоятельные оценки, превосходящие оценки других методов, рассмотренных в работе (рис. 1, *а*, *б*).

5. Результаты имитационного моделирования подтверждают статистическую состоятельность рассматриваемых методов оценивания углов прихода сигналов от абонентских станций. Оценка осуществлялась на основе пространственно-временной выборки на выходе восьмиэлементной линейной эквидистантной антенной решетке, с учетом взаимной корреляции сигналов.

6. В идеальных условиях данные методы углового сверхразрешения позволяют получать сколь угодно точные значения направления прихода сигналов. Вместе с тем, предполагается, что для успешного решения задачи сверхразрешения требуется более высокое качество приема (отношение сигнал/шум). При этом будут точно известны геометрические и электродинамические параметры АР, точные координаты установки антенных элементов

(АЭ) с учетом выполнения условия $d < \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{\max}}$, где d – расстояние между соседними АЭ,

параметры самих разрешаемых сигналов.

7. На основании исследования становится понятным, что глобально оптимального метода сверхразрешения не существует. Привлекательность тех или иных методов в большой степени зависит от наличия и объема априорной информации об исследуемых процессах, от способа оценки результатов векторов отклика АР и способа ее использования применительно к действующей сигнально-помеховой обстановке, конфигурации АР и ее геометрических параметров и др.

Кроме того, существуют определенные отрицательные исходы решений – возникновение ложных отметок об обнаружении несуществующих источников излучений, смещения в оценках направления прихода сигналов.

Сравнительный анализ показал, что проблема использования методов сверхразрешения в задачах пространственно-временного доступа остается актуальной для исследований, поскольку остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с получением объективных оценок предельной точности углов приход сигналов в зависимости от ряда отдельных параметров действующей сигнально-помеховой обстановки.

Результаты моделирования методов с получением численных оценок разрешающей способности показали, что разрешающая способность данных методов позволяет их использовать в задачах пространственно-временного доступа при строго ограниченных условиях.

Список литературы: 1. *Mobile and wireless communications Enablers for the 2020 Information. Society.* EU FP7 ICT-317669-METIS //www.metis2020.com. 2. *Hardouin, Eric.* 5G: an operator's perspective // Orange Labs. LTE World Summit. – 25 June 2013. 3. *Авдеевко, К.Л., Генко, I.О., Корсак, В.Ф.* Ключові принципи спільного доступу до радіочастотного ресурсу на ліцензійній основі (LSA) // Зв'язок. – 2015. – № 6. – С. 49 – 52. 4. *Поповский, В.В.* Эффективное использование всего физического пространства сигналов в мобильных телекоммуникационных системах / В.В. Поповский, Ю.А. Василенко // Межрегиональный форум МСЭ. Национальная комиссия, осуществляющая государственное регулирование в сфере связи и информатизации (НКРСИ), 11-13 сентября, Киев. : Тезисы докладов. – 2012.– С.42-45. 5. *Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation* Edited by: T. Engin Tuncer and Benjamin Friedlander / 2009 Elsevier Inc. P.451. 6. *Advances in Direction-of-Arrival Estimation* / [edited by] *Sathish Chandran.* Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. 2006. P.478. 7. *Vahid Tarokh.* New Directions in Wireless Communications Research Harvard University School of Engineering & Applied Sciences, 2009 P.483. 8. *Johnson, D.H., Miner G.E.* Comparison of superresolution algorithms for radio direction finding // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. – 1986. – Vol.22, No.4. – P.432-441. 9. *Capon, J.* High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proc. IEEE. – 1969. – Vol.57, No.8. – P.1408 – 1418. 10. *Monzingo R.A.* Adaptive antenna arrays: Introduction to the theory / R.A. Monzingo, T.W. Miller; Trans. from English. – M. : Radio and Communications, 1986. – 486 p. 11. *Nickel, U.* Angular superresolution with phased array radar: a review of algorithms and operational constraints // IEE Proc, Pt.F, – 1987. – Vol. 134, No.1. – p.53 – 59. 12. *Gabriel, W.F.* Spectral analysis and adaptive array superresolution technique // Proc IEEE. – 1980 – Vol.68, No.6. – P.654 – 667. 13. *Borgiotti, G.V., Kaplan, L.J.* Superresolutions of uncorrelated interference sources by using adaptive array techniques // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1979. – Vol.27, No.6. – P.842 – 845. 14. *Lavate, T. B., Kokate, V. K., Sapkal, A. M.* Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithms for Adaptive Array Smart Antenna in Mobile Communication // International Journal of Computer Networks (IJCN), vol. 2, iss. 3, 2010.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.11.2017