

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, В.В. Негробов, Ю.Г. Пастернак, Ю.А. Рембовский

Сформулированы основные требования, предъявляемые к современным радиопеленгаторам. Проанализированы пути развития классических методов радиопеленгации и методов сверхразрешения источников радиоизлучения в пространственно-угловых координатах. Намечены перспективные пути совершенствования методов оценки угловых координат источников радиоизлучения

Ключевые слова: радиопеленгация, метод сверхразрешения, антенная решетка

Потребность в быстром и точном определении координат источников радиоизлучения возрастает с увеличением числа мобильных (в том числе - портативных) средств связи:

- в аппаратуре радиоконтроля: при поиске источников радиопомех; с целью обнаружения незарегистрированных передатчиков;
- в службах безопасности: в борьбе с организованной преступностью;
- в военных целях [1]: при определении действий потенциального противника; для получения информации о боевом порядке противника;
- в интеллектуальных системах связи: системы множественного доступа с пространственным разделением каналов (Space Division Multiple Access – SDMA) [2];
- в научных исследованиях: в радиоастрономии; при дистанционном изучении Земли.

Другая причина важности развития теории и техники радиопеленгации заключается в том, что метод разнесения частот все чаще используется в беспроводной связи: спектральные компоненты принимаемого радиоизлучения могут быть ассоциированы с конкретным источником радиоизлучения только в том случае, если известно направление на данный источник. Поэтому совершенствование аппаратуры и соответствующего программного обеспечения радиопеленгаторов является необходимой ча-

стью совершенствования аппаратно-программных комплексов радиоконтроля.

Определение местонахождения источника радиоизлучения, зачастую, является сложным, многоступенчатым процессом. Радиопеленгаторы, размещённые в контролируемой области пространства, позволяют, при использовании метода триангуляции, обнаруживать источник радиоизлучения с точностью до нескольких километров (обычно это  $(1\div3)\%$  от расстояния между радиопеленгаторами). Положение источника радиоизлучения может быть определено и более точно – например, при помощи радиопеленгаторов мобильного (или бортового) базирования, а также – с помощью портативных радиопеленгаторов.

К современным радиопеленгаторам предъявляются следующие основные требования:

- высокая точность оценки угловых координат источников радиоизлучения, наблюдаемых в широкой полосе частот, в реальном масштабе времени;
- высокая чувствительность и разрешающая способность по угловым координатам;
- высокая стойкость к воздействию мощных радиосигналов и стабильность работы в случае наличия некогерентных помех;
- возможность учета и компенсации искажений поля, вызванных многолучевым характером распространения электромагнитных волн;
- возможность учета и компенсации дифракционных искажений наблюдаемой картины поля;
- возможность приема радиоволн произвольной поляризации и точной оценки их параметров;
- возможность обнаружения и оценки параметров источников кратковременных сигналов.

---

Ашихмин Александр Владимирович – ВФ ЗАО «ИРКОС» (г. Москва), д-р техн. наук, тел. (4732) 39-23-00

Козьмин Владимир Алексеевич – ВФ ЗАО «ИРКОС» (г. Москва), канд. техн. наук, доцент, тел. (495) 615-73-02

Негробов Владимир Владимирович – ВГТУ, аспирант, тел. (903) 653-21-64

Пастернак Юрий Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (4732) 23-12-46

Рембовский Юрий Анатольевич – ВФ ЗАО «ИРКОС» (г. Москва), канд. физ.-мат. наук, тел. (495) 615-73-02

Удовлетворить в достаточной мере вышеперечисленным требованиям можно лишь в случае рационального построения антенных систем радиопеленгаторов и создания соответствующих алгоритмов реально-временной обработки принимаемых ими сигналов,

В то же время, данные требования являются во многом противоречивыми, что делает в принципе невозможным создание некоего, гипотетического, «идеального» радиопеленгатора.

Поэтому актуальной является задача формулировки критерия оптимизации характеристик и параметров аппаратно-программного комплекса радиопеленгации, зависящих от характеристик и параметров антенной системы, а также от возможностей специального программного обеспечения обработки принимаемых сигналов, при заданных в техническом задании ограничениях на допустимую сложность и стоимость аппаратной и программной частей комплекса, массо-габаритные показатели аппаратуры, совокупности требований по условиям эксплуатации и т.д.

При постановке задачи на проектирование антенной системы аппаратно-программного комплекса радиопеленгации и создание специального программного обеспечения обработки принимаемых сигналов необходимо учитывать следующие противоречия и найти удовлетворительный компромисс между:

- высокой точностью оценки угловых координат источников радиоизлучения (для реализации которой требуется использовать более строгие модели, описывающие рассеяние электромагнитных волн на антенной системе, ее носителе и опорной мачте, на основе которых построены алгоритмы обработки принимаемых сигналов, компенсирующие дифракционные искажения измеряемой амплитудно-фазовой картины поля) и пропускной способностью, которая обратно пропорциональна количеству вычислительных операций, необходимых для программной реализации данных алгоритмов, а также ширине рабочей полосы частот;

- высокой чувствительностью (для обеспечения которой необходимо увеличивать действующую длину электрически коротких антенных элементов, пропорциональную их геометрической длине, увеличивать количество элементов в подрешетках, а также увеличивать длину антенн бегущей волны) и уменьшением габаритных размеров и заметности аппаратуры, а также – повышением ее пропускной способности (растущей при уменьшении числа элементов антенной решетки, а также – при ис-

пользовании простых вибраторных антенных элементов, имеющих фазовый центр, в противоположность антеннам бегущей волны, у которых он отсутствует, что требует использования более сложных алгоритмов обработки принимаемых сигналов);

- малыми инструментальными погрешностями измерения угловых координат источников радиоизлучения и высокой чувствительностью (с одной стороны, инструментальные погрешности пеленгования уменьшаются с ростом отношения сигнал/шум на выходе антенного элемента, в частности – при увеличении его геометрических размеров, с другой стороны – при увеличении размеров антенной системы и усложнении ее морфологии, как правило, существенно растет степень вносимых дифракционных искажений в наблюдаемое поле, что приводит к повышению погрешности пеленгования);

- высокой разрешающей способностью по угловым координатам (зачастую, достигаемой с помощью использования алгоритмов сверхразрешения источников радиоизлучения в пространственной области; при отсутствии априорной информации о максимально возможном числе источников приходится увеличивать число элементов решетки, создавая при этом, кроме того, возможность оценки пространственного спектра не только сигналов, но и когерентных и некогерентных помех) и высокой пропускной способностью аппаратуры (для численной реализации алгоритмов сверхразрешения требуется значительное количество вычислительных операций);

- возможностью приема радиоволн произвольной поляризации и точной оценки их параметров и пропускной способностью (требуется либо, увеличение числа элементов антенной решетки, либо использование достаточно строгих моделей или достаточно полных баз данных о комплексной векторной диаграмме направленности каждого элемента антенной решетки и специального алгоритма обработки принимаемых сигналов, позволяющего оценить поляризационные параметры принимаемого излучения: наклона поляризационного эллипса, соотношения его осей, сдвига фаз между ортогональными составляющими);

- возможность обнаружения и оценки параметров источников кратковременных сигналов (в частности, сигналов с наносекундной и субнаносекундной эффективной длительностью) и сложностью аппаратной реализации в случае использования моноимпульсной аналоговой антенной решетки, либо – уменьшением

чувствительности при использовании цифровой антенной решетки (вследствие оцифровывания выходных сигналов каждого антенного элемента в отдельности, характеризующихся большим уровнем зашумленности, чем выходной сигнал полнофункциональной аналоговой фазированной антенной решетки).

Попытаемся далее кратко обрисовать историческую ретроспективу путей развития классических методов оценки угловых параметров источников радиоизлучения.

В 1888 году Генрих Герц открыл направленные свойства антенн, проводя исследования сконструированного им радиопередатчика, функционирующего в дециметровом диапазоне волн. Неизотропность излучения антенн (в том числе – и простейших антенных устройств: коротких электрических вибраторов и малых рамочных антенн) явилась тем их свойством, которое впервые было использовано Шеллером (1906 год), а также Беллини и Тоси (1907 год) для определения направления распространения падающей электромагнитной волны.

В 1917 году Эдкоком было выяснено, что с помощью двух противофазно запитанных вертикальных электрических вибраторов, размещенных друг от друга на расстоянии  $L \ll \lambda_0$ , в горизонтальной (азимутальной) плоскости можно получить диаграмму направленности, аналогичную диаграмме направленности рамочной антенны, это позволило существенно повысить точность оценки угловых координат источников радиоизлучения, функционирующих в коротковолновом диапазоне. Приблизительно с 1931 года антенны Эдкока нашли практическое применение в аппаратуре радиопеленгации, выпускаемой в Великобритании и Германии.

В 1925-1926 годах Ватсоном-Ваттом было предложено использовать электронные визуальные пеленгаторы вместо механических угломерных пеленгаторов.

Основным достоинством метода Ватсона-Ватта является непрерывность индикации пеленга и возможность проведения моноимпульсного полноазимутального поиска источников радиоизлучения.

В радиопеленгаторах Ватсона-Ватта наиболее часто используются рамочные антенны (в том числе – многovitковые на ферритовом стержне), а также – антенны Эдкока (монопольные или дипольные решетки).

Пересеченные рамочные («crossed-loop») антенны с анализатором Ватсона-Ватта находят широкое применение в мобильных и бортовых радиопеленгаторах, благодаря их компактно-

сти. Им присущи следующие преимущества и недостатки:

- преимущества: минимальная требуемая длительность сигнала, простота реализации, компактность;
- недостатки: малоапертурная система ( $L/\lambda_0 < 0.2$ ) приводит к существенным погрешностям пеленгования в случае многолучевого распространения электромагнитных волн, значительно возрастает погрешность пеленгования при падении электромагнитных волн с направлений, близких к зенитному.

Радиопеленгаторы, оснащенные антеннами Эдкока, обладают следующими преимуществами (по сравнению со случаем использования пересеченных рамочных антенн):

- существенно меньшей погрешностью пеленгования в условиях многолучевого приема;
- возможностью применения антенн с более широкой апертурой для избежания ошибок в случае распространения волны по различным траекториям (например, для 8-створчатой антенны Эдкока с диаметром  $L/\lambda_0 < 1$ ).

Возможность использования в радиопеленгаторах антенных систем с большой базой ( $L/\lambda_0 > 1$ ) впервые показана немецкой фирмой «Телефункен» в 1943 году при создании радиопеленгатора, предназначенного для функционирования в полосе частот от 6 до 20 МГц, конструкция которого предложена Вулленвебером.

Достоинствами радиопеленгаторной системы Вулленвебера являлись высокая чувствительность и точность пеленгования, а также высокая устойчивость к помехам, вызванным многолучевым характером распространения волн коротковолнового диапазона. Антенная система радиопеленгатора Вулленвебера позволяла различать несколько некоррелированных источников радиоизлучения, функционирующих в одном частотном поддиапазоне. Недостатками антенно-фидерной системы является ее сложность и громоздкость, а также существенные трудности при реализации коэффициента частотного перекрытия более 10.

В 1941 году был сконструирован первый радиопеленгатор на основе эффекта Доплера.

Быстрое усовершенствование радаров в Великобритании привело к необходимости освоения всё более высокочастотных диапазонов: уже в 1943 году были созданы радиопеленгаторы с частотами функционирования вплоть до 3 ГГц. С 50-х годов прошлого века большинство аэропортов по всему миру было оборудовано доплеровскими УКВ/КВ радиопеленгатор-

ными системами, предназначенными для контроля воздушного пространства.

В псевдодоплеровских системах используется быстрая коммутация элементов кольцевой антенной решетки, в качестве которых наиболее часто используются симметричные или несимметричные электрические вибраторы.

Во второй половине прошлого столетия существенный вклад в теорию и технику радиопеленгации внесли О.В. Белавин, В.А. Вентцель, Л.С. Гуткин, И.С. Кукес, В.К. Мезин, Д.Р. Родс, В.С. Ульянов, С.Е. Фалькович, В.В. Ширков и другие ученые в нашей стране и за рубежом.

Наиболее перспективными направлениями развития теории и техники радиопеленгации стали:

- совершенствование многоканальных радиопеленгаторов, оснащенных антенными решетками;
- широкое внедрение методов цифровой обработки сигналов;
- разработка методов пеленгации широкополосных источников радиоизлучения;
- разработка методов компенсации инструментальных погрешностей пеленгования, внесенных антенной системой, внешними и внутренними источниками шума, неидентичностью каналов, погрешностями оцифровки и т.д.;
- разработка методов и алгоритмов разрешения нескольких источников, функционирующих в одной и той же полосе частот (как для некоррелированных между собой сигналов, так и для взаимнокоррелированных сигналов).

Развитие вклад в развитие цифровых методов обработки сигналов в многоканальных радиопеленгаторах внесли О.Е. Антонов, В.И. Белов, В.П. Демин, В.П. Денисов, Д.Х. Джонсон, Р.Л. Джонсон, Ю.В. Ильченко, Г. Косел, С.Л. Марпл мл., Дж.Е. Минер, М.П. Моуди, Дж. П. Рейли, А.А. Поваляев, Х. Хайсен, Р.О. Шмидт и многие другие отечественные и зарубежные ученые.

Усилия многих разработчиков аппаратуры радиопеленгации, в частности, ведущих мировых лидеров в данной области – фирм Rohde&Schwarz (Германия) и TCI (США) [3, 4] направлены на создание эффективных методов и алгоритмов обработки принимаемых сигналов, направленных на реально-временную компенсацию систематической погрешности измерения угловых координат источников радиоизлучения, обусловленной дифракционными явлениями, возникающими при рассеянии па-

дающей электромагнитной волны на антенной системе, опорной мачте и корпусе ее носителя (автомобиля, летательного аппарата, морского судна).

Ввиду того, что корпус носителя может иметь сложную геометрическую форму и значительные электрические размеры, актуальной задачей является создание адекватных физикоматематических моделей, описывающих процессы рассеяния электромагнитных волн на электродинамических объектах в резонансной области частот, рис. 1-2. Актуальность создания моделей радиопеленгаторных антенных систем, установленных вблизи различных рассеивателей, обусловлена также и тем, что получить экспериментальным путем достаточно полную базу данных угло-частотных зависимостей амплитуд и фаз колебаний на выходах элементов антенной решетки весьма непросто, особенно для радиопеленгаторов, базируемых на летательных аппаратах и морских судах.



Рис. 1. Радиопеленгатор TCI 903, установленный на шасси автомобиля высокой проходимости

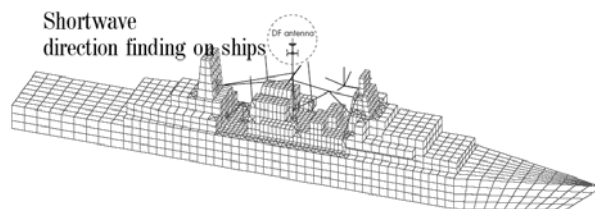


Рис. 2. Модель вибраторной кольцевой антенной решетки радиопеленгатора коротковолнового диапазона, установленной на мачте морского судна (фирма Rohde & Schwarz, Германия)

Начиная с шестидесятых годов прошлого века и до настоящего времени многие отечественные (Ю.И. Абрамович, А.Б. Гершман, В.В. Караваев, Д.И. Леховицкий, Е.С. Макаров, В.Н.

Манжос, Ю.Б. Нечаев, В.В. Сазонов, О.П. Черемисин, Я.Д. Ширман и др.) и зарубежные (A. Barabell, J. Bohme, K.M. Buchley, J. Capon, B. Friedlander, T. Kailath, M. Kavech, M. Haard, K.V.S. Hari, X. Mestre, M.P. Moudi, A. Nehorai, B. Ottersten, U. Pillai, B.D. Rao, D.P. Reilly, T. Sarkar, R. Schmidt, P. Stoica, L. Swindlehurst, M. Viberg, M. Wax, A. Weiss, G. Xu, M. Zolotowski) исследователи интенсивно развивали методы оценки угловых координат источников радиоизлучения со сверхразрешением [5-65].

Приведем ниже результаты сравнительного анализа алгоритмов сверхразрешения источников радиоизлучения в пространственной области, основанных на измерении амплитудно-фазового распределения электромагнитного

поля в ряде точек пространства с помощью антенной решетки и позволяющих разрешать несколько источников радиоизлучения в одной и той же полосе частот, угловое расстояние между которыми может быть даже существенно меньшим, чем ширина главного лепестка диаграммы направленности используемой антенной системы.

Используя терминологию математического аппарата нечеткой логики (оценки вида: «Максимальная», «Высокая», «Средняя», «Низкая», «Минимальная») [справочник по математике], можно обобщить результаты исследований методов сверхразрешения, приведенных в [31, 34- 64] в таблице.

Сравнение основных характеристик методов сверхразрешения источников радиоизлучения

| Название метода           | Разрешающая способность | Смещение оценок пеленгов | СКО оценки угловых координат ИРИ | Чувствительность к погрешностям измерения амплитуд и фаз, отношению сигнал/шум на входе | Пропускная способность |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|---|------------------------|
| <b>MUSIC</b>              | Высокая                 | Низкое                   | Низкое                           | Минимальная   | Средняя                |
| <b>ROOT-MUSIC</b>         | Максимальная            | Низкое                   | Низкое                           | Низкая  | Максимальная           |
| <b>EV</b>                 | Высокая                 | Низкое                   | Низкое                           | Минимальная   | Средняя                |
| <b>ESPRIT</b>             | Максимальная            | Низкое                   | Низкое                           | Низкая  | Максимальная           |
| <b>Берга</b>              | Средняя                 | Среднее                  | Средняя                          | Высокая   | Высокая                |
| <b>Кейпона</b>            | Минимальная             | Максимальное             | Максимальная                     | Высокая   | Высокая                |
| <b>«Теплового шума»</b>   | Средняя                 | Среднее                  | Средняя                          | Высокая   | Высокая                |
| <b>Борджотти-Лагунаса</b> | Максимальная            | Средняя                  | Средняя                          | Максимальная  | Высокая                |
| <b>Отношения Рэлея</b>    | Высокая                 | Минимальное              | Минимальное                      | Средняя   | Минимальная            |

С точки зрения использования в комплексах радиопеленгации и радиоконтроля наиболее перспективными, с точки зрения авторов, являются методы ROOT-MUSIC и ESPRIT и их модификации, как характеризующиеся максимальной разрешающей способностью и пропускной способностью, и при этом практически не уступающие методам MUSIC и EV по чувствительности к погрешностям измерения амплитуд и фаз сигналов на выходах элементов антенной системы, а также – по чувствительности к шумам.

В методах MUSIC и EV рациональным образом сочетаются высокая разрешающая способность, минимальная чувствительность к инструментальным погрешностям измерений, неидентичности каналов приемной антенной системы и малые значения среднеквадратической погрешности пеленгования, а также – незначительные смещения оценок пеленгов в широкой полосе частот.

В условиях многолучевого приема электромагнитных волн весьма актуальным представляется применение и дальнейшее развитие

методов сверхразрешения коррелированных сигналов. В этой связи нельзя не отметить перспективность разработки и совершенствования методов и алгоритмов предварительной обработки принимаемых сигналов, направленных на декорреляцию принимаемых сигналов, позволяющих затем эффективно использовать стандартные методы сверхразрешения некоррелированных источников (MUSIC, EV, ROOT-MUSIC, ESPRIT, TLS-ESPRIT и др.) для оценки параметров коррелированных источников радиоизлучения.

Необходимо отметить, что перспективными направлениями развития методов сверхразрешения источников радиоизлучения также являются:

- снижение чувствительности к погрешностям измерения амплитуды и фазы (в ряде серийно выпускаемых комплексов радиоконтроля погрешности измерения фазы достигают  $\pm 5^\circ$ , погрешность измерения амплитуды может достигать  $\pm 1$  дБ);

- снижение чувствительности к погрешностям в оценке числа действующих источников (особенно, метода ROOT-MUSIC);

- учет дифракционных искажений наблюдаемой картины поля;

- обеспечение инвариантности к априорно неизвестному виду поляризации принимаемых электромагнитных волн, что особенно актуально для радиопеленгаторов мобильного базирования.

Приведем далее наиболее интересные результаты патентного поиска, относящиеся к конструкциям радиопеленгаторных антенных решеток [66-93].

Варианты конструкций кольцевых радиопеленгаторных антенных решеток, состоящих из несимметричных ТЕМ- рупоров, образованных совокупностью радиальных проводочных излучателей, показаны на рис. 3, 4 [66].

Авторы патента [66] показали, что в низкочастотной области функционирования каждый элемент в составе решетки характеризуется квазиторoidalной диаграммой направленности, постепенно трансформирующейся, с ростом частоты, в игольчатую (характеризующуюся значением коэффициента усиления до 10-11 дБ). Таким образом, данное техническое решение позволяет существенно расширить частотный диапазон одной литеры антенной решетки и повысить чувствительность радиопеленгатора в высокочастотной области его функционирования благодаря направленным свойствам ТЕМ- рупоров.

Использование данной антенной решетки дает возможность эффективной реализации процедуры амплитудно-фазового пеленгования: на первом этапе, с помощью амплитудного метода пеленгования, грубо определяется угловая координата источника радиоизлучения; на втором этапе значение пеленга уточняется с использованием зависимостей фаз наведенных напряжений на выходах антенных элементов от угла падения волны и частоты колебания.

Наряду с очевидными преимуществами описанных вариантов антенных решеток, состоящих из несимметричных проводочных ТЕМ- рупоров (простоты конструкций, расширения полосы рабочих частот и чувствительности с ростом частоты, низкого аэродинамического сопротивления), очевидными являются и следующие недостатки: невозможность оценки угловых координат источников с горизонтальной поляризацией и наличие широкой «мертвой» зоны в окрестности зенитного направления.

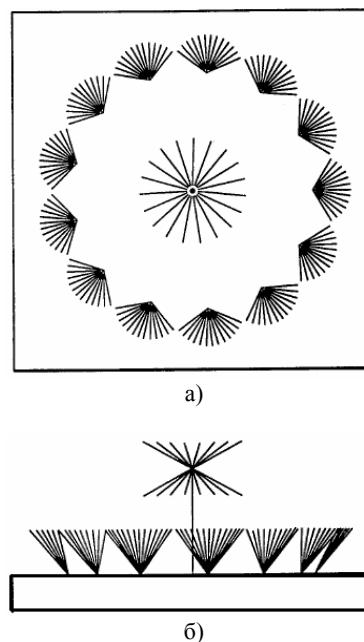


Рис. 3. Вариант конструкции однолитерной антенной решетки, состоящей из несимметричных проводочных ТЕМ- рупоров

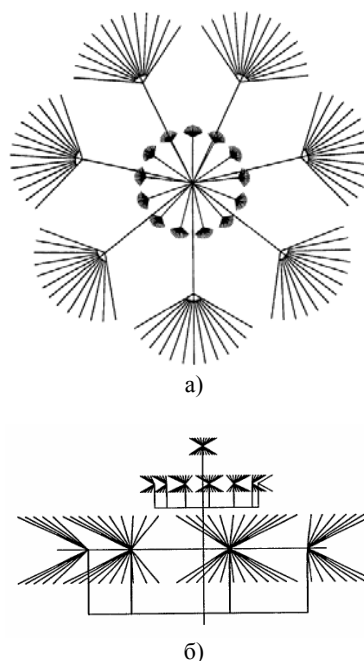


Рис. 4. Вариант конструкции двухлитерной антенной решетки, состоящей из несимметричных проводочных ТЕМ- рупоров

Обобщая сделанные выше выводы относительно перспективных путей развития методов оценки угловых координат источников радиоизлучения, можно сформулировать их следующим образом:

- одной из важных задач является создание эффективных методов и алгоритмов обработки принимаемых сигналов в многоканальных ра-

диопеленгаторах, инвариантных к априорно неизвестным: виду поляризации падающих волн, геометрии и материальных свойств корпуса носителя (и/или опорной мачты);

- весьма актуальным является разработка методов и алгоритмов пеленгования, отличающихся сниженной чувствительностью к погрешностям измерения амплитуд и фаз принимаемых сигналов;

- актуальным является создание радиопеленгаторов, позволяющих оценивать угловые координаты источников радиоизлучения с произвольным видом поляризации и характеризующихся отсутствием «мертвых» зон в пространстве наблюдения, представляющем собой полусферу (наземное и морское базирование радиопеленгатора) или сферу (бортовые радиопеленгаторы);

- высокая актуальность разработки радиопеленгаторов, позволяющих оценивать угловые координаты источников, излучающих сверхкороткие импульсы;

- традиционно важными вопросами являются повышение чувствительности радиопеленгаторов, точности пеленгования, разрешающей способности, а также – уменьшение габаритных размеров их антенных систем, что напрямую связано с живучестью комплексов в боевых условиях.

#### Литература

1. ITU Spectrum Monitoring Handbook, Radiocommunication Bureau, Geneva, 1995.
2. Godara L.C.: Application of Antenna Arrays to Mobile Communication, Part 1 Proceeding of the IEEE, Vol. 85, № 7, July 1997. Part 2 № 8, Aug. 1997
3. www.rohde-schwarz.com.
4. www.tcibr.com.
5. Макаров Е.С. Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой: Дис. канд. физ.-мат. наук. Воронеж. 2009. – 164 с.
6. Макаров Е.С., Нечаев Ю.Б. Оценка точности пеленгования когерентных сигналов малоэлементными радиопеленгаторами // Теория и техника специальной радиосвязи. 2008. № 3. С. 42-50.
7. Зотов С.А., Макаров Е.С., Нечаев Ю.Б. Методы сверхразрешения в задачах радиопеленгации // Информационные процессы и технологии в обществе и экономике. – 2006. № 3. – С. 12-26.
8. Мюнье Ж., Делиль Ж.Ю. Пространственный анализ в пассивных локационных системах с помощью адаптивных методов // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75. № 11. – С.21-37.
9. Кейпон Дж., Гринфилд Р.Дж., Колкер Р.Дж. Обработка данных Большой сейсмической группы способом многомерного максимального правдоподобия // ТИИЭР. – 1967. – Т. 55. № 22. – С.66-82.
10. Гейбриел У.Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68. № 6. – С.19-32.

11. Johnson D.H., DeGraaf S.R. Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays // ASSP-30. – 1982. – PP. 638-647.

12. Johnson D.H., DeGraaf S.R. Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays by eigenvalue analysis // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. – 29. – 1982. – PP. 401-413.

13. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // Proc. RADC Spectrum Estimation Workshop. – 1979. – PP. 243-258.

14. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. Antennas Propagation. – 1986., vol. 34., № 3. – PP. 276-280.

15. Добырин В.В., Немов А.В. Эффективность применения сверхразрешающих спектральных оценок в бортовых угломерных фазированных антенных решетках // Радиотехника. – 1989. № 9. – С.65-67.

16. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения // Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. 584 с.

17. Barabell A.J. Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms // Proc. IEEE ICAPSSR 83. – 1983. – PP.336-339.

18. Paulraj A.A., Roy R., Kailath T. Subspace Rotation Approach to Signal Parameter Estimation // Proceeding of the IEEE. – 1986. – PP. 1044-1045.

19. Кайлатх Т., Полрадждж А., Рой Р. Оценивание параметров сигнала методом поворота подпространств // ТИИЭР. – 1986. Т. 74., № 7., - С. 165-166.

20. Kailath T., Roy R. ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques // IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Process. – 1989. – vol. 37., № 7. – PP. 984-995.

21. Godara L.C. Smart Antennas. CRC Press, 2004. – 457 p.

22. Reddi S.S. Multiple source location – a digital approach // IEEE Trans. Aerospace and Electron Syst. – 1979. – vol. 15. – PP. 95-105.

23. Kailath T., Wax M. Detection of signals by information theoretic criteria // IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1985. – vol. 33. № 2. – PP. 387-392.

24. Bai. Z.D., Krishnaiah P.R., Zhao L.C. On the detection of number of signals in the presence of white noise // J. Multivariate Anal. – 1986. – vol. 20 (1). – PP. 1-25.

25. Rissanen J. Modeling by the shortest data description // Automatica. – 1978. – vol. 14. – PP. 465-471.

26. Ермолаев В.Т., Мальцев А.А., Родюшкин К.В. Статистические характеристики критериев АИС и MDL в задаче оценки числа многомерных сигналов в случае короткой выборки // Изв. вузов. Радиофизика. – 2001. - № 12. – С. 1062-1069.

27. Ермолаев В.Т., Родюшкин К.В. Функция распределения максимального собственного числа выборочной корреляционной матрицы собственного шума элементов антенной решетки // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. - № 5. – С. 494-500.

28. Родюшкин К.В. Анализ статистических свойств максимального шумового собственного числа выборочной корреляционной матрицы антенной решетки при наличии сигнала // Изв. вузов. Радиофизика. – 2001. - № 1-2. – С. 285-290.

29. Ermolaev V.T., Maltsev A.A., Rodushkin K.V. Detection characteristics of antenna array using the maximum eigenvalue of the sample correlation matrix as solving statistic // Proceedings of International Conference JINA98. – 1998. – Nice.

30. Мороз А.В., Есакова Н.Г. Анализ собственных значений выборочной корреляционной матрицы процесса из двух комплексных экспонент и аддитивного белого

- гауссовского шума // Радиотехника и электроника. – 1990. – № 5. – С. 1014-1020.
31. Леховицкий Д.И., Милованов С.Б., Раков И.Д. Универсальные адаптивные решетчатые фильтры. Адаптация при заданном корне из оценочной корреляционной матрицы // Изв. вузов. Радиофизика. – 1992. – № 11-12. – С. 969-991.
32. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения // ТИИЭР. – 1982. – Т. 70. № 9. – С. 126-138.
33. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учебное пособие для вузов – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: БИНОМ, 2004. – 636 с.
34. Леховицкий Д.И., Манжос В.Н., Ширман Я.Д. Некоторые этапы развития и проблемы теории и техники разрешения радиолокационных сигналов // Радиотехника. – 1997. – № 1. – С. 31-42.
35. Kaveh M., Barabell A.J. The statistical performance of the MUSIC and the minimum-norm algorithms in resolving plane waves in noise // IEEE Trans. Acoust, Speech, Signal Processing. – 1986. – vol. ASSP-34. – PP.331-341.
36. Xu X.-L., Buckley K.M. Bias Analysis of the MUSIC location estimator // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1992. – vol. 40. – PP. 2559-2569.
37. Xu X.-L., Buckley K.M. Bias and variance of direction-of-arrival estimate from MUSIC, MIN-NORM, and FINE // IEEE Trans. Signal Process. – 1994. – vol. 42. – PP. 1812-1816.
38. Xu X.-L., Buckley K.M. An analysis of beam-space source localization // IEEE Trans. Signal Process. – 1993. – vol. 41. – PP. 501-504.
39. Nehorai A., Stoica P. Performance comparison of subspace rotation and MUSIC methods for direction estimation // IEEE Trans. on Acoust., Speech., Signal Process. — 1991. – vol.39, – № 2. – PP. 446-453.
40. Rao B.D., Hari K.V.S. Performance Analysis of Root-Music // IEEE Trans, on Acoust., Speech and Signal Processing. – 1985. – vol. ASSP-37 – №12. – PP. 1939-1949.
41. Rao B.D., Hari K.V.S. Weighted subspace methods and spatial smoothing: analysis and comparison // IEEE Transaction. Signal Process. – 1993. – vol. 41. – № 2. – PP. 788-803.
42. Nehorai A., Stoica P. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound // IEEE Trans, on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1989. – vol. 37. – PP. 720-741.
43. Nehorai A., Stoica P. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound: further results and comparisons // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. – 1990. – vol. 38. – PP. 2140-2150.
44. Hurt N.E. Maximum Likelihood Estimation and MUSIC in Array Localization Signal Processing: A Review // Multidimensional Systems and Signal Processing. – 1990. – vol. 1. – PP. 279-325.
45. Nehorai A., Ottersten B., Viberg M. Performance analysis of direction finding with large arrays and finite data // IEEE Trans. Signal Process. – 1995. – vol. 43. – PP. 469-477.
46. Черемисин О.П. Эффективность адаптивных методов пеленгации помех. // Радиотехника и электроника. – 1989. – вып. 9. – С. 1850-1861.
47. Добырин В.В., Немов А.В. Эффективность применения сверхразрешающих спектральных оценок в бортовых угломерных фазированных антенных решетках // Радиотехника. – 1999. – № 9. – С. 65-67.
48. Аджемов С.С., Бокк Г.О., Зайцев А.Г. Исследование алгоритмов сверхразрешения в адаптивных «пенных решетках. // Радиотехника. – 2000. – №11. – С. 66-71.
49. Гершман А.Б., Ермолаев А.Т., Флакман А.Г. Адаптивное разрешение некоррелированных источников по координате. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1988. – № 8. – С. 941-946.
50. Гершман А.Б., Ермолаев А.Т., Флакман А.Г. Анализ сверхразрешения некоррелированных источников излучения в адаптивных антенных решетках // Изв. вузов. Радиофизика. – 1988. – № 11. – С. 1674-1379.
51. Леховицкий Д.И., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г. Разновидности сверхразрешающих анализаторов пространственно-временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров // Антенны. – 2000. – № 2. – С. 40-54.
52. Доросинский Л.Г. Выбор метода совместного измерения угловых координат нескольких источников излучения // Радиотехника. – 1987. – № 11. – С. 43-45.
53. Черемисин О.П. Адаптивные алгоритмы обработки сигналов в многоканальных приемных системах с антенными решетками // Радиотехника и электроника. – 2006. – № 9. – С. 1087-1098.
54. Черемисин О.П. Адаптивная пеленгация источников интенсивных сигналов в многоканальных системах // Радиотехника и электроника. – 1992. – № 12. – С. 2199-2209.
55. Черемисин О.П. Адаптивное выделение сигналов на фоне интенсивных помех в многоканальных системах // Радиотехника и электроника. – 1992. – № 3. – С. 449-458.
56. Ратынский М.В. Анализ характеристик алгоритмов пеленгации со сверхразрешением. // Радиотехника. – 1992. – № 10-11. – С. 63-66.
57. Rao B.D., Hari K.V.S. Performance analysis of ESPRIT and TAM in determining the direction of arrival of plane waves in noise // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. – 1989. – vol. 37. – PP. 1990-1995.
58. Kailath T., Ottersten, B., Viberg M. Performance analysis of the total least squares ESPRIT algorithm // IEEE Trans. Signal Process. – 1991. – vol. 39. – PP. 1122-1135.
59. Коновалов Л.И., Меркуленко И.Д. Определение угловых координат источников излучения с использованием плоской эквидистантной антенной решетки по методу максимального правдоподобия // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1988. – Т. 31. № 1. – С. 6-12.
60. Бондаренко Б.Ф., Платонов С.Ю., Сашук И.Н. Разрешающая способность алгоритма MUSIC // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – № 1. – С. 51-60.
61. Хачатуров В.Р., Федоркин Ю.А., Коновальчик А.С. Влияние случайных фазовых ошибок приемных каналов антенной решетки на качество разрешения источников внешнего излучения // Антенны. – 2000. – № 2. – С.55-59.
62. Friedlander B. A sensitivity analysis of the MUSIC algorithm // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1990. – vol. 38, Issue 10. – PP. 1740-1751.
63. Li F., Vaccaro R.J. Sensitivity analysis of DOA estimation algorithms to sensor // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1992. – vol. 28, Issue 3. – PP. 708 - 717.
64. Friedlander B. Effect of modeling errors on the resolution threshold of the MUSIC algorithm // IEEE Trans. Signal Process. – vol. 42. – PP. 1519-1526.
65. Huans Y.F., Soon V.C. An analysis of ESPRIT under random sensor uncertainties // IEEE Trans. Signal Process. – 1992. – vol. 40. – PP. 2353-2358.
66. US Patent 6198454, H01Q 013/00 Broadband fan cone direction finding antenna and array/, Eugene D. Sharp, Sandy W. His. – 1998.
67. US Patent 7205955, H01Q 1/50 Antenna H01Q 1/50 / Toshiaki Shirotsaka, Shingo Fujisawa. – 2005.



68. US Patent 6940469, H01Q001/12 Antenna arrangement / Maximilian Göttl, Wolfgang Mummert, Walter Staniszewski. – 2005.
69. US Patent 6342870, H01Q 001/12 Antenna frame structure mounting and alignment / Mehrkens, Thomas K. Overton, Steven R. – 2002.
70. US Patent 6781558, H01Q 934 Antenna mast and method / Jeffrey H. Steinkamp. – 2004.
71. US Patent 6239747, G01S 3/46 (20060101), G01S 3/02 (20060101), G01S 3/14 (20060101) Antenna system and method for direction finding / Walter Joseph Kaminsk. – 2001.
72. US Patent 6211846, H01Q 001/12 Antenna system for radio direction-finding / Jean-Pierre Gouin. – 2001.
73. US Patent 6982680, H01Q 1/12 Antenna tower and support structure therefor / Darin M. Janoschka, John L. Beafore, Anthony W. Peavy. – 2006.
74. US Patent 6570543, H01Q 007/04 H01Q 001/52 Conformal, high-frequency, direction-finding antenna / Ruell F. Solberg, Jr., Steven P. Saulnier, C. Nils Smith, William G. Guion. – 2003.
75. US Patent 6806837, H01Q 128 Deep depression angle calibration of airborne direction finding arrays / Norman D. Paul, Norman E. Saucier. – 2004.
76. US Patent 6278406, G01S 005/02 Direction finder and device for processing measurement results for the same / Kuwahara, Yoshihiko. – 2001.
77. US Patent 4769531, G01S 3/78 (20060101) G01S 3/783 (20060101) Direction finder system with inclined detectors / Fritz J. Malek. – 1988.
78. US Patent 6914559, G01S005/02 Direction finding method and system using digital directional correlators / Maury I. Marks. – 2005.
79. US Patent 4766439, G01S 3/14 (20060101), G01S 3/32 (20060101) Direction finding system / Misek, Victor A. - 1988.
80. US Patent 5822050, G01B 011/26 Direction finding system / Ohtomo Fumio, Tokuda Yoshikatu, Yoshino Ken-ichiro. – 1998.
81. US Patent 6771224, H01Q 112 Direction finding system using body-worn antenna / Apostolos John T. – 2004.
82. US Patent 5465097, G01S 005/04 Direct sequence spread spectrum direction finder / Fry, Robert J. – 1995.
83. US Patent 7221322, H01Q 1/38 Dual polarization antenna array with inter-element coupling and associated methods / Timothy E. Durham, Anthony M. Jones, Griffin K. Gothard, Sean Ortiz. – 2007.
84. US Patent 6987489, H01Q 13/00, H01Q 19/17 Electronically scanning direction finding antenna system / Arsen Melconian, David Steward, Gregory Lackmeyer, John Longyear, Paul Crane. – 2006.
85. US Patent 4724442, G01S 3/14 (20060101), G01S 3/40 (20060101), G01S 3/02 (20060101), G01S 3/12 (20060101) Method and apparatus for loop direction finding with no ambiguity / Dennis D. King. – 1988.
86. US Patent 6693591, G01S 3/74 (20060101), G01S 3/02 (20060101) Method and device for co-operative radio direction-finding in transmission / Anne Ferreol, Fran.cedilla.ois Delaveau. – 2004.
87. US Patent 6407702, G01S 003/46 Method and system for obtaining direction of an electromagnetic wave / Jan Bergman, Tobia Carozzi, Roger Karlsson. – 2002.
88. US Patent 6784840, G01S 502, G01S 504 Method for determining azimuth and elevation angles using a single axis direction finding system / Lionel N. Menegozzi Edward, Van Alstine. – 2004.
89. US Patent 7119739, G01S 7/40, H01Q 3/26 Near field to far field DF antenna array calibration technique / Keith A. Struckman. – 2006.
90. US Patent 6897807, G01S005/02 Radio-wave arrival-direction estimating apparatus and directional variable transceiver / Takaaki Kishigami, Takashi Fukagawa, Yasuaki Yuda, Masayuki Hoshino. – 2005.
91. US Patent 5502450, G01S 003/02 Single antenna direction-finding system / Joseph H. Zablotney, Steven F. Gorman. – 1996.
92. US Patent 6492959, H01Q 001/12 Stacked array antenna system, Alan E. Heatherwick, Edward L. Ostertag, Myron D. Fanton, Kerry D. Scharp, Walter J. Mamak. – 2002.
93. US Patent 6950064, G01S005/02 System and method for ascertaining angle of arrival of an electromagnetic signal / Hans Gregory Schantz. – 2005.

Научно-производственное предприятие ЗАО «ИРКОС», г. Москва  
Воронежский государственный технический университет

## THE ANALYSIS OF PERSPECTIVE DEVELOPMENT DIRECTIONS OF THE ANGULAR COORDINATES' ESTIMATION METHODS OF RADIO EMISSION SOURCES

A.V. Ashihmin, V.A. Kozmin, A.V. Negrobov, Yu.G. Pasternak, Yu.A. Rembovsky

The basic requirements to modern radiodirection finders are formulated. Ways of classical methods' development of radiodirection finding and superresolution methods of a radio emission sources at spatial - angular coordinates are analysed. Perspective ways of perfection of angular coordinates' estimation methods of radio emission sources are planned

Key words: radio direction finding, superresolution method, antenna array