

Обзор методов борьбы с пассивными помехами в радиолокационных системах

к.т.н. Великанова Е.П., Рогожников Е.В.

Томский государственный университет управления и радиоэлектроники
8 (382) 241-34-78, raliens@mail.ru, udzhon@mail.ru

к.т.н. Ворошилин Е.П.

Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23, voroshilin@mami.ru

Аннотация. В статье представлен обзор существующих методов борьбы с пассивными помехами, выполненный по современным отечественным и зарубежным источникам. Рассмотрены методы борьбы с пассивными помехами в передающем, антенном трактах, тракте промежуточной частоты, а также в блоках первичной и вторичной обработки радиолокационной информации. Представлены статистические, а также спектральные методы.

Ключевые слова: пассивные помехи, селекция движущихся целей, доплеровская фильтрация, пространственно-временная обработка, вторичная обработка, отражения от подстилающей поверхности.

Введение

Одним из основных назначений радиолокационных систем (РЛС) является обнаружение, оценка координат и сопровождение интересующих объектов в зоне контроля. Пассивные помехи представляют собой радиосигналы, отраженные мешающими объектами при их облучении зондирующими сигналами РЛС. Их воздействие проявляется в подавлении и маскировке сигналов, отраженных от наблюдаемой цели. Интенсивность помех может существенно превышать не только уровень собственных шумов приемника, но и полезный сигнал цели, что затрудняет ее радиолокационное наблюдение, а иногда делает его вообще невозможным [1]. Целью статьи является обзор существующих методов борьбы с пассивными помехами. Помимо традиционных методов представлены и новые направления, в которых идет развитие решения этой задачи на текущий момент времени.

Основная часть

Организация процесса подавления пассивных помех может осуществляться в разных функциональных частях радиотехнической системы. Рассмотрим основные из них [1–3].

Передающий тракт. Борьба с помехами здесь возможна за счет правильного выбора частоты, длительности и периода повторения зондирующего импульса, изменения закона поляризации и т.п. Как известно, контраст между сигналами, отраженными от цели и подстилающей поверхности, увеличивается при уменьшении длительности импульса. Увеличение длины волны также является эффективным методом борьбы с некоторыми видами пассивных помех (стаи птиц, скопление насекомых, метеообразования). Использование круговой поляризации является действенным средством борьбы с отражениями от метеообразований.

Антенный тракт. Здесь возможны следующие способы борьбы с помехами: уменьшение ширины диаграммы направленности (ДН) и уровня её боковых лепестков; отклонение ДН антенны вверх (чтобы снизить уровень отражений от подстилающей поверхности); использование двухлучевых антенн.

Тракт промежуточной частоты. Временная автоматическая регулировка усиления, мгновенная автоматическая регулировка усиления, дискриминатор по длительности импульса (мешающее отражение и активная помеха могут обладать значительно большей длительностью, чем зондирующий сигнал) и т.п.

Блок первичной обработки РЛ информации. Режекторные фильтры, набор узкополосных фильтров, селекция движущихся целей.

Блок вторичной обработки РЛ информации. Формирование карты помех, отбраковка ложных отметок на этапе построения траекторий целей.

На текущий момент основная тенденция в дальнейшем развитии методов борьбы с пассивными помехами ориентирована на усовершенствование алгоритмов первичной и вторичной обработки. Поэтому далее приведено их более подробное описание.

Блок первичной обработки

Существующие алгоритмы обнаружения на фоне помех в зависимости от принципа действия используют либо статистические различия целей и пассивных помех, либо спектральные.

Статистические методы. Математической основой этой группы алгоритмов является разработанная теория обнаружения сигналов на фоне помех. При наличии полной априорной статистической информации о сигнале и помехе, синтез оптимального алгоритма обнаружения не вызывает затруднений. В частности, схема оптимального обнаружителя сигнала на фоне коррелированных гауссовских помех состоит из обеляющего фильтра и оптимального обнаружителя на фоне белого шума (рисунок 1) [3]. На рисунке 1 введены следующие обозначения: $F_c(j\omega)$ – спектр сигнала, G_0 – энергетический спектр белого шума, $G_{nn}(j\omega)$ – спектр пассивной помехи.

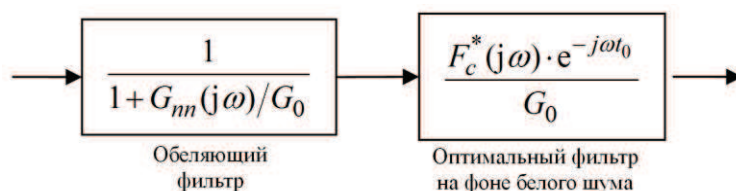


Рисунок 1. Схема оптимального обнаружителя сигнала на фоне коррелированных гауссовских помех

Однако энергетический спектр $G_{nn}(j\omega)$ (корреляционные свойства помехи), а также доплеровское смещение частоты отраженного сигнала (обусловленного движением цели), как правило, неизвестны.

Задача синтеза оптимального алгоритма обнаружения в условиях априорной неопределенности может быть решена с применением адаптивного байесовского (параметрического) подхода. В этом случае алгоритм обнаружения синтезируется при полной априорной определенности, после чего неизвестные параметры алгоритма обнаружения заменяются их оценками. Так, например, можно решить проблему априорной неопределенности доплеровской частоты отраженного сигнала с помощью измерителя доплеровской фазы сигнала или многоканального фильтра доплеровских частот. Однако для приближения рабочих характеристик таких алгоритмов к оптимальному требуется наличие большого числа каналов обработки, что увеличивает вычислительные затраты и затрудняет их реализацию на практике [4].

Основными возможными методами решения проблемы априорной неопределенности корреляционных свойств помехи являются: градиентные методы, реализуемые, как правило, с помощью принципа корреляционной обратной связи [5]; рекуррентные [6] и методы прямой оценки, основанные на адаптивном байесовском подходе [7].

Другое направление развития статистических методов связано с разработкой алгоритмов, нечувствительных или слабочувствительных к неизвестным статистическим характеристикам сигналов и помех [4]. Так, например, известен инвариантный алгоритм обнаружения когерентного сигнала с неизвестной амплитудой и случайной начальной фазой на фоне гауссовских помех, где в качестве предпороговой статистики предлагается использовать инвариантную статистику Хотеллинга T_2 , распределение которой в отсутствии сигнала не зависит от корреляционной матрицы помехи.

Достоинством инвариантного алгоритма обнаружения является то, что его структура не зависит от доплеровской частоты отраженного сигнала, следовательно, отпадает необходимость в её оценке или в построении многоканального обнаружителя. Платой за это достоинство является ухудшение рабочих характеристик данного алгоритма обнаружения по сравнению с оптимальным [4].

Существует множество непараметрических обнаружителей сигнала на фоне белого шума - ранговых, знаково-ранговых, знаковых. Однако попытки синтеза непараметрического алгоритма обнаружения на фоне коррелированных помех для конечного числа наблюдений наталкиваются на непреодолимые математические трудности и поэтому получены лишь эвристическим путем [4].

При неизвестных статистических параметрах распределения сигналов и помех можно воспользоваться алгоритмом обнаружения с нейросетевой структурой [4]. Однако существенным недостатком такого типа алгоритмов является их затрудненный анализ и сложность получения рабочих характеристик. Кроме того, фактор универсализации в этом случае существенно повышает вычислительные затраты на адаптацию. В этой связи нейросетевые структуры применяются только в наиболее простых задачах, например при сжатии радиолокационного сигнала.

В целом алгоритмы, использующие статистические различия целей и помехи обладают эффективностью, приближающейся к теоретически достижимой, нежели группа спектральных алгоритмов обнаружения. Однако, более высокая эффективность первой группы алгоритмов обнаружения соответствует и большим вычислительным затратам, что ограничивает область их применения на практике [4].

Спектральные методы. Данная группа алгоритмов использует спектральные различия сигналов от целей и пассивных отражателей. При известных параметрах зондирующего сигнала и использовании в приемнике оптимального по отношению сигнал /шум фильтра для оптимизации обработки сигнала при наличии пассивной помехи необходимо ввести второй фильтр, подавляющий частотные составляющие спектра помехи, которые отличаются от сигнальных на значение разности их доплеровских смещений. Такая фильтрация, называемая селекцией движущейся цели (СДЦ), является эффективным средством улучшения радиолокационного наблюдения на фоне пассивных помех и находит достаточно широкое применение в РЛС различного назначения [1].

Для режекции помехи возможно использование нерекурсивных и рекурсивных цифровых фильтров. Существенным недостатком нерекурсивных фильтров является неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в области прозрачности, а также значительный проигрыш в эффективности обнаружения по сравнению с оптимальным алгоритмом обнаружения [4].

Один из широко известных способов режекции помехи основан на постоянстве амплитуды видеоимпульсов на выходе фазового детектора от периода к периоду повторения при отражении от неподвижных объектов, что позволяет осуществить череспериодную компенсацию (ЧПК) сигналов мешающих отражений. Амплитудно-частотная характеристика простой нерекурсивной ЧПК n -го порядка имеет вид: $K(f) = |2^n \cdot \sin^n(\pi f T_n)|$, где T_n – период повторения импульсов. Действие системы ЧПК показано на рисунке 2. На нем совмещены спектр сигнала от неподвижного объекта и АЧХ схемы ЧПК [8].

Как видно из рисунка 2, спектральные линии сигналов от неподвижного объекта точно попадают в провалы АЧХ гребенчатого фильтра. В идеале, когда спектр помехи имеет вид δ -функций на частотах nF_n (где F_n – частота повторения δ -функций), фильтр полностью ослабляет спектральные составляющие сигнала от неподвижного объекта [1]. В реальной ситуации, спектр помехи расплывается вокруг частот nF_n и полное подавление отражений не обеспечивается. Расширение спектра помех в частности обусловлено волнениями отражаю-

щей поверхности (морская поверхность, лесной массив и т.п.). Достоинством алгоритма ЧПК являются низкие вычислительные затраты, а недостатком - низкая эффективность при обнаружении сигнала на фоне многомодовых пассивных помех, а также появление «слепых» скоростей.



Рисунок 2. Спектр сигнала пассивной помехи и АЧХ схемы ЧПК

Выбор спектрального метода обнаружения существенно зависит от того, подвижная или нет сама РЛС. При движении когерентно-импульсной РЛС неподвижные относительно поверхности земли мешающие объекты перемещаются относительно радара с различными радиальными скоростями. В результате сигналы, отраженные от них, получают соответствующие поправки Доплера по частоте и попадают в область прозрачности АЧХ устройства ЧПК. Следовательно, они не могут быть подавлены с помощью режекторных фильтров или системы компенсации, что приводит к ложной тревоге. Задача селекции усложняется в этом случае и тем, что антенная система РЛС может работать в режиме обзора пространства, т.е. изменять положение ДН по азимуту и углу места [2].

Один из самых очевидных способов борьбы в этой ситуации – предварительная компенсация доплеровского набега принимаемого сигнала в зависимости от скорости собственного движения и ориентации ДН. А далее использование стандартных методов борьбы с пассивными помехами от неподвижных объектов. Значение величины доплеровского набега для точки M , на которую направлен максимум ДНА, рассчитывается согласно следующей формуле: $f_d = 2v_{rM}/\lambda = 2v \cdot \cos \alpha_M \cdot \cos \beta_M / \lambda$, где v_{rM} – радиальная скорость радара относительно точки M , v – абсолютная скорость движения радара; α_M и β_M – азимут и угол места цели в точке M [8]. Следует отметить, что полная компенсация пассивных помех в этом случае невозможна, т.к. компенсация доплеровского набега выполняется лишь для сигналов, принятых по главному лепестку ДН. Другим способом борьбы с пассивными помехами при подвижном радаре является метод «остановленного» фазового центра. В этом случае наличие радиальной скорости в сигналах от неподвижных пассивных отражателей устраняется путем перемещения фазового центра антенны радара в направлении, противоположном движению его платформы от импульса к импульсу (рисунок 3).

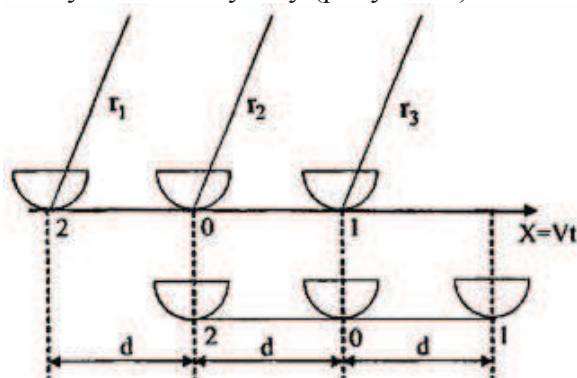


Рисунок 3. Структура системы СДЦ с остановленным фазовым центром

Это осуществляется путем выбора различных участков элементов антенной решетки в продольном направлении при излучении и приеме сигнала на разных последовательных им-

пульсах. Частота следования импульсов должна удовлетворять условию: $F = \frac{V}{d}$, где: d – смещение фазового центра, V – скорость движения платформы. В результате отраженный сигнал от неподвижных целей не имеет доплеровского сдвига частоты и компенсируется стандартными методами СДЦ, описанными ранее. Как видно, этот метод накладывает определенные ограничения на передвижение радара: за один период следования импульсов оно должно быть равно расстоянию между элементами антенной решетки. Это является его существенным недостатком.

На текущий момент одним из перспективных методов СДЦ при подвижном радаре является метод совместной пространственно-временной обработки STAP (Space-time adaptive processing) [9 – 13]. На рисунке 4 [10] изображен азимутально-доплеровский спектр мешающего сигнала от неподвижных объектов местности. Его доплеровская частота зависит от угла между направлением на отражатель и вектором движения радара.

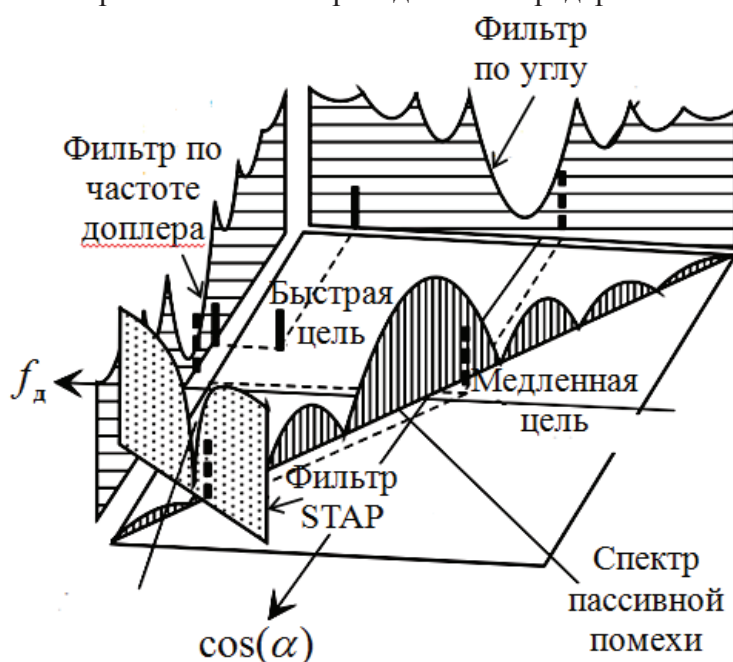


Рисунок 4. Принцип пространственно-временной фильтрации

На рисунке видно, что временная обработка (инверсный фильтр на ожидаемый диапазон доплеровских частот отраженных сигналов) успешно справляется с задачей фильтрации пассивной помехи, однако при этом подавляются и доплеровские составляющие медленных целей, а значит затрудняется их обнаружение.

Пространственная обработка (фильтрация помех с определенного угла прихода) вызывает «ослепление» радара, как по медленным, так и по быстрым целям, попадающих по азимуту в зону подавления.

Пространственно-временная обработка использует такое свойство спектра помехового сигнала, при котором он имеет вид узкого наклонного (в плоскости азимут-доплер) гребня. Поэтому пространственно-временной фильтр в идеале должен иметь такую же форму гребня в азимутально-доплеровском срезе, но в инверсном виде. Тогда даже медленные цели не попадут в область подавления. В этом и заключается принцип работы метода STAP. Следует отметить, что этот метод эффективен и при борьбе с активными помехами.

Для функционирования алгоритма совместной пространственно-временной обработки необходимо знание двумерной ковариационной матрицы помехи. Априорно она, как правило, неизвестна, поэтому её оценивают непосредственно из самих поступающих измерений в тестовых зонах вблизи цели. Результат работы представленного алгоритма показан на рисунке 5 [9].

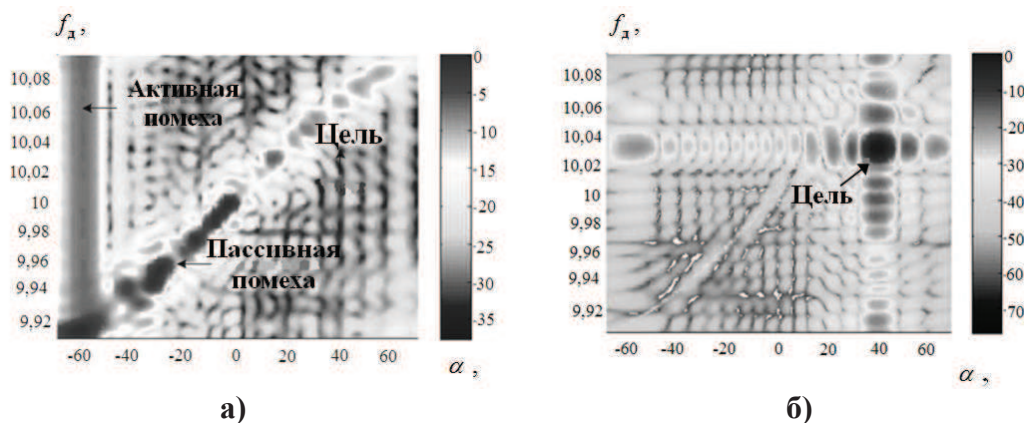


Рисунок 5. Спектр сигнала и помех до и после обработки методом STAP

На рисунке 5а показан азимутально-доплеровский спектр принимаемого сигнала при наличии активной помехи (с угла -60°) и отражений от подстилающей поверхности (диагональная линия). Цель расположена на азимуте в 40° с доплером равным 10,03 кГц. На рисунке 5б представлен спектр сигнала после его обработки методом STAP. Видно, что произошло эффективное выделение полезного сигнала.

Недостатком алгоритма STAP является требование больших вычислительных затрат. Поэтому на текущий момент основные модификации этого метода связаны с его упрощением без существенных потерь в коэффициенте подавления помех.

Все ложные отметки, оставшиеся после первичной обработки радиолокационной информации, в дальнейшем могут быть дополнительно отсеleccionированы в блоке вторичной обработки. Рассмотрим эту процедуру более подробно.

Блок вторичной обработки. Основными функциями блока вторичной обработки является захват (завязка) обнаруженной цели, экстраполяция и оценка параметров её траектории [14 – 16].

Селекция ложных отметок (поступивших с блока первичной обработки) осуществляется путем проверки ряда факторов, которые должны с определенной степенью достоверности подтвердить наличие траекторных данных. Отметки, обусловленные только пассивными помехами, в общем случае не образуют устойчивых последовательностей, подобных целевым, и, соответственно, отбраковываются [2].

Процедура вторичной обработки позволяет сформировать карту помех: пометить те области, где возникает частое появление ложных отметок (не подтвержденных позднее в качестве целевых). Согласно этой информации возможно адаптивное изменение порога обнаружения на этапе первичной обработки с целью минимизации вероятности появления мешающих отметок.

Появление ложных отметок мешает нормальному функционированию процедуры фильтрации траекторий целей, особенно когда возможны их маневры [17]. В связи с этим разработано множество методов борьбы с ложными отметками (NN, PDA, MHT, PMHT и др.). В алгоритме ближайшего соседа (NN – Nearest Neighbor) в качестве целевой отметки принимается та, которая расположена ближе всего к своему ожидаемому значению. В методе PDA (Probabilistic Data Association) для обновления оценки координат цели используются не одна, а все поступившие отметки, но с разным весом. Этот вес определяется вероятностью, что данная отметка не является ложной. В методе MHT (Multi-Hypothesis Tracker) происходит разветвление траектории цели по всем поступающим отметкам, а затем выбор основной методом максимального правдоподобия. Этот алгоритм наиболее близок к оптимальному, но требует огромных вычислительных затрат. В методе PMHT (Probabilistic Multi-Hypothesis Tracker) все поступившие отметки заменяются одной искусственной (согласно определенному правилу) и по ней выполняется обновление параметров траектории цели.

Достаточно сложной ситуацией в плане селекции пассивных помех является случай, когда радар и цель неподвижны, а функционирование выполняется на приземных трассах в пересеченной местности [18 – 24]. Как показано в [25 – 27] и подтверждено экспериментальными данными, поток отметок по сигналам, отраженным от подстилающей поверхности, образует устойчивую последовательность и слабо отличается от полезных (порожденных целью). В этом случае применительно к задачам пассивной радиолокации известен специальный алгоритм [27] вторичной обработки, который позволяет разделить и идентифицировать потоки отметок, порожденных целью и объектами преимущественного отражения, по ряду сигнальных признаков (мощность принимаемого сигнала, дисперсия оценок первичных наблюдений).

Выводы

В представленной статье выполнен обзор и сравнительный анализ методов борьбы с пассивными помехами в РЛС. Борьба с помехами должна осуществляться во всех функциональных частях радиолокационной системы: начиная от выбора параметров зондирующего сигнала и заканчивая использованием специальных алгоритмов первичной и вторичной обработки, модернизация которых и является основной тенденцией на текущий момент времени.

На этапе первичной обработки возможно применение как статистических, так и спектральных методов селекции помех. Алгоритмы, использующие статистические различия целей и помехи, обладают большей эффективностью, по сравнению со спектральными, но требуют и больших вычислительных затрат, что ограничивает область их применения на практике. Эффективной альтернативой указанных методов является метод STAP, который учитывает как спектральные, так и статистические свойства сигналов. При этом он имеет ряд модификаций, направленных на уменьшение объема вычислений.

Следующей ступенью селекции ложных отметок является блок вторичной обработки. Отметки, обусловленные только пассивными помехами, в общем случае не образуют устойчивых последовательностей, подобных целевым, и соответственно отбраковываются. Кроме того, на этом этапе возможно построение карты помех, с помощью которой адаптивно корректируются пороги обнаружения в блоке первичной обработки для дальнейшего уменьшения помехового фона. Использование специальных алгоритмов фильтрации (NN, PDA, МНТ и др.) позволяют сохранить работоспособность радиолокационного сопровождения цели при наличии оставшихся после пройденных этапов селекции ложных отметок.

Выбор того или иного метода борьбы с пассивными помехами зависит от назначения системы (требуемые точностные характеристики и уровень ложных тревог), её расположения (тип окружающей местности, подвижная или неподвижная платформа), класса сопровождаемых целей (подвижные/неподвижные, наземные/морские/воздушные), имеющихся в наличии априорных данных о параметрах целевых и помеховых сигналов, а также требований к объему вычислительных затрат.

Литература

1. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др. // М.: Высшая школа, 1990. – С. 131–141.
2. Бакулев П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей: монография / П.А. Бакулев, В.М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с..
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 319 с.
4. Светлов А.Ю. Адаптивные алгоритмы обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех в когерентно-импульсных РЛС: дис... канд. техн. наук. 05.12.14 / Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2006. – 173 с.
5. Леховицкий Д.И. Обобщенный алгоритм Левинсона и универсальные решетчатые филь-

- тры // Изв. вузов Радиофизика. – 1992. – № 9-10. – С. 790–808.
6. Попов Д.И. Синтез алгоритмов адаптивного режектирования пассивных помех / Д.И. Попов, А.Г. Афанасьева. – Радиоэлектроника. 1996. – № 6. – С. 46-52.
7. Кован С.Е. Синтез алгоритмов обнаружения сигналов на фоне коррелированных помех в частотной области / С.Е. Кован, В.А. Лихарев, Л.А. Страхова // Изв. вузов МВ и ССО СССР Радиоэлектроника. – 1985. – № 7. – С. 28–32.
8. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей // М.: Радио и связь. – 1986. – Т. 288.
9. Sparse sample matrix inversion with diagonal loading for reverberation suppression. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6061800&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6046214%2F6061546%2F06061800.pdf>, платный (дата обращения: 02.04.2014).
10. Space-Time Adaptive Processing: Fundamentals. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-SET-086/EN-SET-086-06.pdf>, свободный (дата обращения: 02.04.2014).
11. PAST and OPAST algorithms for STAP in monostatic airborne radar. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5946130&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5946130, платный (дата обращения: 04.04.2014).
12. Robust Adaptive Signal Processors. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04192003181602/unrestricted/Dissertation_Picciolo.pdf, свободный (дата обращения: 09.04.2014).
13. An overview of space-time adaptive processing for radar. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1278708&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1278708, платный (дата обращения: 02.04.2014).
14. Ворошилин Е.П. Алгоритмы завязки траекторий подвижных объектов / Е.П. Ворошилин, Е.П. Ворошилина, В.И. Тисленко // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2009. – № 2(20). – С. 48–52.
15. Ворошилин Е.П. Алгоритмы сопровождения подвижных объектов / Е.П. Ворошилин, Е.П. Ворошилина, В.И. Тисленко // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2009. – № 2(20). – С. 53–58.
16. Ворошилина Е.П. Анализ методов автоматического сопровождения целей по дальности / Е.П. Ворошилина, В.И. Тисленко // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 67–72.
17. Великанова Е.П. Адаптивная фильтрация координат маневрирующего объекта при изменениях условий передачи в радиолокационном канале / Е.П. Великанова, Е.П. Ворошилин // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26), ч.1 – С. 29–35.
18. Ворошилина Е.П. Новый алгоритм оценки координат в разностно-дальномерной системе при наличии переотражений / Е.П. Ворошилина, В.И. Тисленко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2007. – № 2. – С. 146–150.
19. Великанова Е.П. Повышение точности оценки координат абонента системы мобильной связи посредством контроля за уровнем замираний сигнала в канале распространения / Е.П. Великанова, Е.П. Ворошилин, Е.В. Рогожников // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 199–205.
20. Ворошилин Е.П. Экспериментальная оценка импульсной реакции канала распростране-

- ния радиоволн в сантиметровом диапазоне / Е.П. Ворошилин., В.Ю. Лебедев // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – № 2(18). – С. 7–11.
21. Вершинин А.С. Экспериментальная оценка увеличения точности измерения задержки сигнала в наземных системах радиомониторинга при многоканальном приеме / А.С. Вершинин, Е.П. Ворошилин, В.П. Денисов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22), ч.2 – С. 32–35.
22. Гельцер А.А. Экспериментальная оценка ослабления радиоволн зимним лиственным лесом / А.А. Гельцер, Н.А. Кузнецова // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 2. – С. 26–28.
23. Ворошилин Е.П. Метод повышения точности оценки передаточной функции канала распространения радиоволн / Е.П. Ворошилин, Е.В. Рогожников, А.С. Вершинин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 133–137.
24. Experimental estimation of the time of arrival measurement accuracy increasing along the propagation path at the cost of multi-channel processing. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6053658&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6053658, платный (дата обращения: 05.04.2014).
25. Ворошилина Е.П. Оценка координат наземного источника радиоизлучения / Е.П. Ворошилина, Е.П. Ворошилин, В.И. Тисленко // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2010. – № 1(21), ч. 2 – С. 29–36.
26. Ground target position estimation in passive location. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5540604&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5540604, платный (дата обращения: 12.04.2014).
27. Ворошилина Е.П. Фильтрация разностно-временных наблюдений в задаче оценки координат наземного сканирующего источника радиоизлучения при наличии переотражений от местности: автореф. дис. канд. техн. наук / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2010. – 22 с.