

УДК 629.7.052.3: 621.396.98

Е. Т. Скорик¹, А. В. Крюков²

¹Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

²Науковий центр при Київському військовому інституті управління та зв'язку

Адаптивная компенсация помех в спутниковых радионавигационных системах

Розглядається проблематика завадостійкості апаратури користувачів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), основаної на адаптивному придушенні активних завад в зоні застосування СРНС відповідальними користувачами (авіація, морський флот, силові структури та ін.). Стосовно до особливостей сигналів СРНС та умов їхнього прийому при наявності завад пропонується алгоритм двоетапного адаптивного придушення завад (алгоритм «адаптив-адаптив», чи А²). Як показує аналіз, він дає значну економію технічних і програмних засобів (в деяких випадках до двох порядків) порівняно з алгоритмом повністю адаптивних антенних решіток (ПААР).

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) типа GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) являются системами массового обслуживания, основанными на высокой технологии глобального координатно-временного обеспечения (КВО), которые к началу 21-го столетия гарантируют наиболее точную навигационную информацию широкому классу пользователей.

При создании общегражданской глобальной СРНС типа GNSS эти СРНС выбраны в качестве базовых как для Европы (проекты EGNOS, GALILEO), так и для создаваемой системы КВО Украины путем дополнения существующих СРНС национальными (региональными) наземными и космическими аппаратными и программно-алгоритмическими средствами контроля уровней целостности, надежности и доступности навигационной информации. В этом ряду научно-технических мер поддержание региональной устойчивости КВО в условиях дестабилизирующих факторов — электромагнитных помех разной природы при приеме навигационной информации СРНС аппаратурой пользователей (АП) является важной и актуальной народно-хозяйственной задачей.

В реальной помеховой обстановке часто создаются ситуации, когда без применения специальных мер защиты помехи полностью или частично по-

давляют полезный сигнал, и решение навигационной задачи становится невозможным или реализуется с недопустимыми погрешностями. Поэтому проблема помехоустойчивости АП СРНС в пространственно-временном континууме «навигационное поле — поле помех» является актуальной для многих ответственных пользователей СРНС, включая контрольно-корректирующие станции (ККС), составляющие основу национальных КВО. В связи со сложностью реальной электромагнитной обстановки (ЭМО) в зоне современных аэродромов обеспечение помехоустойчивости аэродромных комплексов систем привода и посадки самолетов по сигналам СРНС (в соответствии с концепцией ICAO CNS/ATM) является приоритетной задачей.

В общем случае полностью надежное функционирование СРНС в помеховой обстановке обеспечивается только при комплексировании в составе АП средств различных источников навигационной информации, включая средства, основанные на других физических принципах (например GPS + «Logan C» или GPS + ИНС — инерциальные навигационные системы). В ряде случаев достаточное функционирование АП в помехах достигается применением в полях СРНС адаптивной пространственной селекции для подавления радиопомех. Целью настоящей публикации является формулировка общей проблемы компенсации помех при реализации планов вступления Украины в проект

EGNOS и освоении концепции ICAO CNS/ATM. Приводится оценка одного из режимов адаптивной помехозащиты АП СРНС.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СРНС

Решение задачи помехоустойчивости навигации и местоопределения в общем случае состоит из следующих этапов:

- обнаружение помех по превышению порога, обычно адаптивного;
- выделение помеховых направлений в пространстве;
- собственно компенсация помех;
- выделение сигнала из шума согласованной фильтрацией (обнаружение сигнала);
- декодирование сигнала (выделение навигационной информации).

Практически все эти условно выделенные этапы являются в той или иной мере адаптивными, предназначенными для обеспечения автоматического решения задачи местоопределения в условиях помех при поддержании заданного уровня точности, доступности и целостности.

В этом ряду различают следующие случаи:

- помехоустойчивость в условиях активных преднамеренных помех, в том числе и имитационных уводящих помех, когда реализуется радиоэлектронное противодействие (РЭП) радионавигации в оперативной обстановке особого периода;
- помехоустойчивость в непреднамеренных помехах от источников радиосигналов систем связи (особенно подвижной сотовой), телевизионных вещательных каналов, радиолокационных и импульсных промышленных электромагнитных полей (например силовых сетей и систем зажигания автомобилей).

Отдельной задачей является подавление пассивных помех, образующихся за счет отражения сигналов НКА от местных предметов, окружающих антенну АП и от подстилающей поверхности. Интерференционные помехи особенно сильно проявляются при низком размещении НКА над горизонтом. Их влияние сказывается в первую очередь на точности координатных определений. На практике проблема интерференции навигационных полей устраняется двумя способами: пассивным — использованием основания антенны со специальными круговыми дроссельными проточками глубиной около $\lambda/4$, где λ — средняя рабочая длина волны, и активным — применением высокоэффективной

программы «Эверест». Так как отраженный сигнал всегда запаздывает относительно прямого, то с помощью этой программы, используемой в высокоточных геодезических приемниках, дискриминируется передний фронт сигнала от запаздывающего в пределах десятков наносекунд.

В настоящей работе рассматривается только задача подавления активных непреднамеренных помех.

СПЕЦИФИКА СИГНАЛОВ СРНС И ПОМЕХ

Особенностями приема сигналов СРНС, определяющими применяемые меры помехозащиты, являются предельно малый уровень их сигналов у поверхности Земли (-160 дБ·Вт при соотношении сигнал к тепловому шуму $C/\text{Ш} = -20$ дБ для кода C/A) и кодовый квазишумовой тип манипуляции (в GPS — CDMA, а в ГЛОНАСС — FDMA). По нормам Федеральной комиссии по связи FCC США, любой сигнал выше уровня шумов на входе АП СРНС является помехой и должен быть подавлен фильтрами, структурно-сигнальными или пространственными методами до уровней, не вызывающих отказа или ошибки в местоопределении.

По нормам Международного Союза радиосвязи ITU уровни плотности мощности сигналов СРНС в диапазоне от 1.525 ГГц до 2.5 ГГц у поверхности Земли не должны превышать -154 дБ·Вт/м² в любой полосе 4 кГц, чтобы не создавать помехи каналам наземной подвижной связи, работающим в этом же частотном участке на первичной основе. Эффективная площадь слабонаправленной приемной связной антенны в диапазоне L_1 составляет примерно -25.4 дБ/м². Сигнал кода C/A GPS имеет у Земли уровень -160 дБ·Вт в полосе 1.023 МГц. Следовательно, максимальная плотность СВЧ мощности СРНС в полосе 4 кГц (34.1 дБ·Гц) на выходе антенны будет равна

$$W = -160 \text{ дБ} \cdot \text{Вт} - 34.1 \text{ дБ} \cdot \text{Гц} + 25.4 \text{ дБ/м}^2 = \\ = -158.7 \text{ дБ} \cdot \text{Вт/м}^2.$$

Видим, что запас относительно норм ITU составляет только 4.7 дБ. Для навигационных космических аппаратов (НКА) новых проектов GPS Block IIА сигнал, принимаемый АП, составляет -157 дБ·Вт, т. е. на 3 дБ лучше, чем в старых, и следовательно, запас становится меньше 2 дБ. Это означает, что приемники GPS не имеют другой возможности увеличить свою сигнальную устойчивость за счет излучаемой мощности НКА, кроме как за счет корреляционной обработки кода — согласованной фильтрации в эквивалентной узкой полосе 1 Гц,

когда реализуется сжатие при обработке до 70 дБ и эффективное соотношение С/Ш на выходе АП от 38 до 42 дБ. Дальнейшая помеховая устойчивость АП СРНС реально достигается только адаптацией в частотной и пространственной областях.

ЭМО при размещении GPS антенны на корабле связана с наличием на этом же борту по крайней мере двух излучающих радиосистем. Одна из них в диапазоне L — терминал INMARSAT-A на расстоянии 10 м от фазового центра антенны GPS создает в течение 10 мин на частоте 1636.5 МГц излучение с плотностью мощности 3 Вт/м². Другая — это импульсный навигационный судовой радиолокатор, излучающий в S -диапазоне при вращении антенны со скоростью 20 об./мин пакет из 10 импульсов с $P_{\text{имп}} = 60$ кВт с частотой повторения $F = 600$ имп./с, с длительностью 1—1.5 мкс и со скважностью 1600:1. Этот радиолокатор оказывает на АП СРНС воздействие в виде перемежающихся импульсных внеполосных помех.

Гораздо более сложная ЭМО реально наблюдается для АП СРНС, в частности для ККС в зоне действия крупных аэродромных комплексов. В общем случае речь идет о проблеме электромагнитной совместимости ККС как способности ККС нормально функционировать в условиях заданной ЭМО. В документе ИСАО [3] в качестве критерия помехоустойчивости приемников СРНС ККС приняты достаточно жесткие требования на нормы ухудшения точности по дальности (1σ) не более 0.4 м для GPS и не более 0.8 м для ГЛОНАСС и ошибок в цифровой передаче не хуже 1 слова на 10^4 слов для обеих СРНС. Приведены типовые нормы уровней гармонических и шумоподобных помех (от -150 дБ·Вт) и их частотных полос (до 40 МГц) и импульсных помех с пиковой мощностью 0 дБ·Вт длительностью до 125 мкс при скважности менее 0.1.

АДАПТИВНЫЕ АНТЕННЫ

В общем случае задача помехоустойчивости АП решается применением специальных антенн в виде многоэлементной фазированной антенной решетки (ФАР) или АР с диаграммообразующей схемой (ДОС) с алгоритмами пространственной адаптации. Теория адаптивных решеток (ААР) достаточно хорошо разработана [2] и нашла свою успешную реализацию в радиолокации и в радиосвязи.

По определению пространственная фильтрация ААР заключается в автоматическом определении направления прихода помехи и формировании нуля диаграммы направленности (ДН) ААР в помеховом

направлении. Местоопределение и навигация по сигналам СРНС относятся к классу задач, решаемых пассивным беззапросным методом приема шумоподобных фазокодируемых сигналов (ШПС) с системной синхронизацией, и к этой задаче адаптивные методы помехозащиты полностью применимы [1].

При использовании ААР в системах связи вообще и в СРНС требуется высокая степень совместимости структуры применяемых сигналов с параметрами ААР по ряду причин. Так, весовые коэффициенты ААР в динамике могут модулировать полезный сигнал случайными процессами адаптации, особенно если различия сигнала и помехи в максимальной степени не учтены. Необходимо располагать копией полезного сигнала и системной синхронизацией, что в АП СРНС обычно доступно. Так как такой алгоритм как максимизация отношения сигнал к шуму (МОСШ) требует знания ковариационной матрицы помех, собственных шумов и направления прихода полезных сигналов, то схема обработки в ААР должна опознавать полезный сигнал по структуре. В частности, кодированный сигнал СРНС позволяет реализовать в ААР критерий минимальной средней квадратичной ошибки (МСКО), при котором уже не требуется априори знание направления прихода полезных сигналов. Поэтому учет формы сигнала и способ подавления помех в ААР для АП СРНС должны быть использованы комплексно.

Известны также такие недостатки алгоритма МОСШ, когда нули, сформированные на помеху, частично затрагивают направление полезного сигнала, и при этом каждая новая помеха расстраивает ААР. Учет структуры ШПС увеличивает помехоустойчивость СРНС и в пределе делает алгоритмы МОСШ и МСКО практически эквивалентными.

На выбор ФАР или ДОС для ААР влияют три фактора: требуемое разрешение нулей, поле обзора и ширина основного луча в направлении на полезный сигнал. Как правило, число элементов ФАР или число лучей ДОС должны иметь порядок числа помех, а сама АР выбирается разреженной. Для размеров решетки $D/\lambda = 10$ —15 ФАР и ДОС практически эквивалентны по реализуемым параметрам в режиме ААР, однако для ШПС ДОС более предпочтительны в связи с их частотной независимостью. Кроме того, ДОС позволяет использовать для компенсации помех не только режим ААР, но и такую эффективную технику, как компенсаторы с открытой петлей в режиме прямого вычитания.

В технической литературе по частичному решению задачи помехоустойчивости АП СРНС сравни-

- валились следующие два экспериментальных метода:
- адаптивный алгоритм ориентации минимума ДН АР на помеху. ААР состояла из 6—9 малогабаритных слабонаправленных антенных элементов. Коэффициент подавления одиночной стационарной помехи достигал 50 дБ;
 - программный алгоритм наведения максимума ДН на НКА. Была разработана ДОС в виде 36-элементной линзы Ротмана. Выходы линзы выбирались на известные угловые направления НКА. Применение узконаправленных ДН позволяло подавлять помеху (без адаптации) по боковым лепесткам (БЛ) на 15 дБ и более.

МЕТОД ДВУХЭТАПНОЙ АДАПТАЦИИ

Несмотря на относительно хорошо разработанную математическую общую теорию АР, техническая проблема помехоустойчивости АП СРНС на практике не может считаться полностью решенной. Поэтому мы предлагаем и анализируем метод адаптивного подавления помех для АП ответственных пользователей и для ККС общего применения, который не имеет недостатков и одновременно сохраняет преимущества двух предыдущих методов. Предлагаемый метод имеет условное название «адаптив—адаптив» или A^2 , т. е. метод двойной или двухэтапной адаптации.

По определению ААР с полной адаптацией (ПААР) считается базовой структурой по компенсации помех. ПААР состоит из АР и элементарных когерентных корреляционных автокомпенсаторов (АК) (рис. 1) Аппельбаума [4], установленных в каждом канале АР (рис. 2). Элементарный АК с контуром слежения О-типа является полностью устойчивой структурой, чем объясняется его широкое использование в ААР в аналоговом и цифровом форматах.

ПААР реализует градиентный алгоритм кратчай-

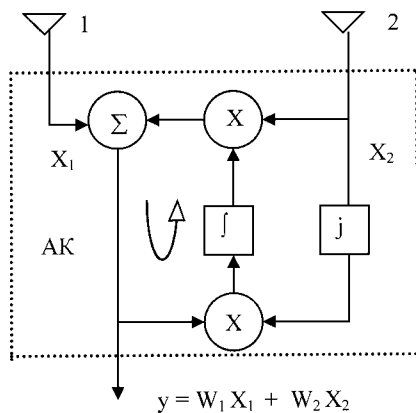


Рис. 1. Когерентный корреляционный автокомпенсатор

шего спуска. Теоретически ПААР обеспечивает сквозной алгоритм МСКО, эквивалентный в данной конфигурации алгоритму МОСШ. Эта структура ААР во многом эквивалентна по рабочим характеристикам (скорости схождения и конечным результатам) рекуррентным алгоритмам, реализуемым, в том числе, с помощью систолических вычислительных структур и инверсии выборочных ковариационных матриц (ВКМ или SMI — sample matrix inversion). Полностью адаптивный режим как некий частный случай конечного автомата является математической процедурой, которая обладает следующей особенностью [5]. Речь идет о повышенной чувствительности алгоритма ПААР в линейном приближении к неидентичности (неидеальности) элементов АР. Действительно, если включить в схему (рис. 3) автоматический режим адаптации при наличии полезного сигнала с С/Ш, превышающим определенный порог, все неидентичности АР начинают формировать в АК искусственный помеховый сигнал типа специфического «вируса» по основному направлению, что приводит к заметному подавлению собственного сигнала (рис. 4), в некоторых случаях до 7 дБ. К другим недостаткам режима ПААР относят искажение формы главного

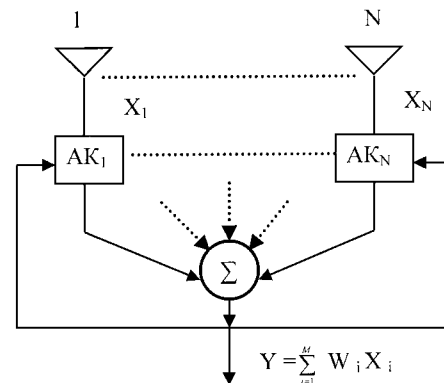


Рис. 2. Базовая структура полностью адаптивной антенной решетки

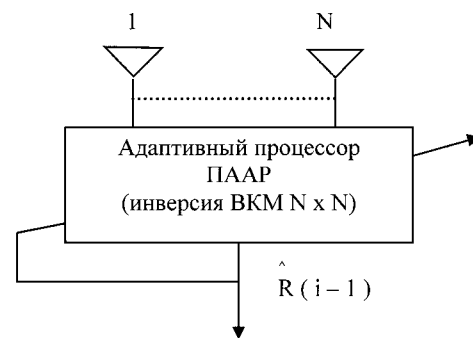


Рис. 3. Обобщенная схема адаптивного процессора ПААР

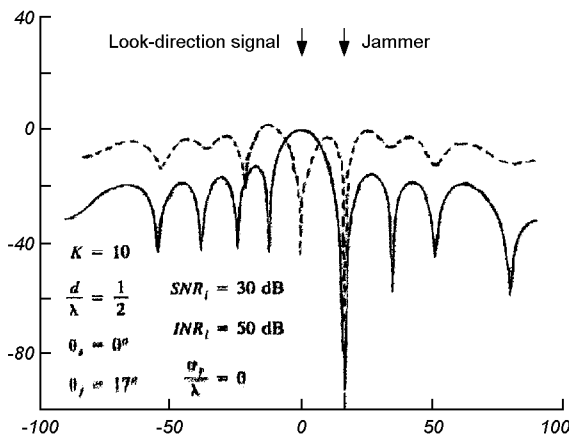


Рис. 4. Результаты моделирования идеальной (1) и неидеальной (2) ПААР

лепестка ДН ААР при формировании нуля на помеху, что на практике также ухудшает С/Ш по собственному сигналу. В ряде случаев при реализации структурной избирательности перед согласованным фильтром по сигналу необходимо устанавливать фильтр, отбеливающий структуру помехи.

Алгоритм A^2 с априорной информацией о полезных сигналах не обладает комплексом недостатков ПААР. Задача состоит в синтезе квазиоптимальной структуры частично адаптивной АР для АП СРНС с максимальным использованием априорной информации по сигналам и помехам, т. е. сводится к поиску наилучшего алгоритма для заданного применения. Поскольку такой детальной априорной информации на практике не может быть, особенно в случае перемежающихся помех, адаптивный процессор по A^2 является разумной альтернативой построения АП СРНС с требуемой помехоустойчивостью в реальных условиях местоопределения и навигации.

Процессор A^2 , строго говоря, является подоптимальной структурой с предпроцессором, решающей уравнение правдоподобия с порогом — «наличие/отсутствие сигнала». Среди многих используемых на практике критериев эффективности помехозащиты (МОСШ, максимум правдоподобия МП, максимальное подавление помехи МПП, максимум коэффициента передачи МКП АР, максимальной энтропии МЭ) выбираем отношение сигнала к сумме помехи и шума С/П + Ш как меру отношения всей желательной мощности сигнала ко всей нежелательной мощности на выходе адаптивного процессора. Эта мера качества близка к оценке МП и входит в оценку точности местоопределения АП СРНС при наличии шумов.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ МЕТОДА

Рассмотрим отличия дискриминации помехи алгоритмами ПААР и A^2 .

Предположим, что имеется одномерная АР из N элементов. Пусть X_{it} (где $i = 1, 2, \dots, N - 1$) — выборки электромагнитного поля на раскрые АР, причем X — сумма интерферирующих помех и тепловых шумов:

$$X_{it} = J_{it} + N_{it}.$$

Здесь J_{it} — помеха на i -м элементе АР в момент времени t ; N_{it} — то же для гауссового теплового шума.

Оценка пространственной корреляционной функции выборок АР выражается как

$$\hat{R}_{(i-1)} = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^M X_{it} X_{it}^*, \quad (1)$$

где \hat{R} означает оценку, а M — число временных выборок. Как видим, $R_{(i-1)}$ — это оценка первой строки (row) ковариационной матрицы, использующей алгоритм SMI. Далее, для оценки координат помех определяют полный пространственный спектр от (1).

При гауссовом характере тепловых шумов оценка местоположения источников помех J определяется следующим образом:

$$\hat{X}_j = \frac{\sum_j (1/\sigma_j^2) \cdot (X_j - b_j)}{\sum_j (1/\sigma_j^2)}, \quad (2)$$

где X_j — координата помехи, b_j — смещение оценки, σ_j^2 — дисперсия оценки.

Из выражения (2) следует, что при алгоритме ПААР, кроме операций определения пространственной корреляции, обращения матриц и углового спектра по всему раскрыю АР, необходимо проводить также операции оценок координат и их дисперсий. Кроме аппаратных и вычислительных затрат, это приводит ко взаимному влиянию операций подавления помех на процессы обработки полезных сигналов, и в частности, к искажениям ДН по сигналам.

Общая структурная схема компенсатора помех по алгоритму A^2 показана на рис. 5. Основу структуры составляет АР, содержащая N входов и $J + 1$ выходов, где J — число помех. ДОС формирует главный луч (один или несколько по числу НКА) и J дополнительных лучей на помехи. В результате в устройстве SMI производится вычитание помех из смеси С + П в главных лучах ДОС.

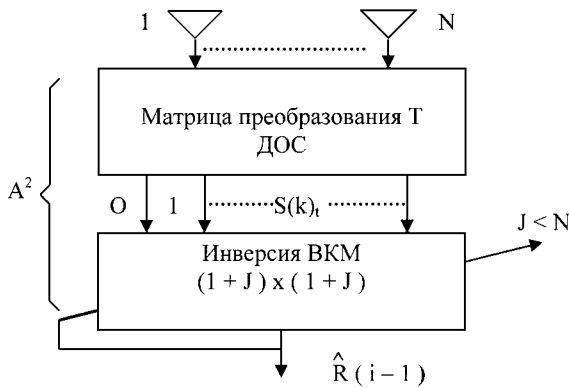


Рис. 5. Обобщенная схема адаптивного процессора A^2

Нахождение угла помехи в этом случае фактически состоит в дискретном преобразовании Фурье (ДПФ), выполняемом цифровой или аналоговой ДОС:

$$S(k)_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_{ji} \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right). \quad (3)$$

Тогда оценку $\hat{U}(k)$ находят из (3) следующим образом:

$$\hat{U}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [S(k)_i].$$

Здесь, как и в (1), M — число временных выборок в полосе сигналов и помех.

Угловой спектр $U(k)$ представляет собой N лучей, сформированных в угловом u -пространстве $\pm 90^\circ$, в котором лучи АР имеют равный разнос:

$$u = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta.$$

Здесь θ — угол от нормали к АР, d — шаг АР, λ — длина волны сигнала.

Оценку точности углового спектра помехи получают как:

$$\sigma_{\theta_j} = \frac{\theta_3}{\sqrt{2M(J/N)_j}}, \quad (4)$$

где θ_3 — ширина ДН ДОС антенны по уровню 3 дБ, равная $\lambda/(N+1)d$ в радианах; $(J/N)_j$ — отношение уровней помеха/тепловой шум для j -й помехи на выходе ДОС.

Если помеха достаточно сильна (интересующий нас случай), оценка углового спектра σ_{θ_j} по (4) может быть получена при $M = 1$, что соответствует одной временной выборке. Это наблюдается уже при

$(J/N)_j \geq 10$, где N_j — мощность шума в j -элементе решетки.

Теперь, когда для локализации помехи используется только одна временная выборка, для нахождения ее в угловом спектре с помощью ДПФ достаточно применить только $N/2 \log_2 N$ комплексных умножений. Даже в случае близко расположенных помех и применении методов сверхразрешения типа МЭ требуются только одноразовые временные выборки, именно благодаря большому уровню помех на выходе ДОС. После дискриминации помех формируются вспомогательные лучи в направлении помех (рис. 5) с однозначностью: на J помех J лучей. Далее используются стандартный алгоритм SMI или алгоритм Аппельбаума совместно с формированием основного луча.

Таким образом, первоначальная решетка из N элементов трансформируется в эквивалентную решетку из $J+1$ элементов-лучей, к которым может быть применен адаптивный алгоритм, например алгоритм SMI на $J+1$ портов. Теперь пусть P — есть оценка корреляционной матрицы трансформированной эквивалентной АР. Оптимальные веса для такой АР в режиме A^2 выражаются как

$$W = P_T^{-1} T,$$

где T — матрица размером $1 \times (J+1)$, дающая $T^s = [1, 0, 0, 0, \dots, 0]$, где s — позиции транспонирования.

В пределе ААР по алгоритму A^2 имеет существенно ту же эффективность подавления помех, что и ПААР в случае, когда помехи близки к ортогональности по углу и спектру между собой и к сигналу. В частности, подавление помехи по алгоритму A^2 определяется с достаточной на практике точностью как

$$R_j = \frac{1}{1 + (J/N)_j},$$

что для $(J/N)_j > 10$ становится просто равным $R_j = (N/J)_j$.

Таким образом, эффективность A^2 в этом первом приближении идентична той, которая наблюдается у ПААР в случае если число вспомогательных лучей равно или превышает число помех. В тоже время алгоритм A^2 дает существенную экономию вычислительных средств. Действительно, вместо инверсии матрицы $N \times N$ достаточно инвертировать матрицу $(J+1) \times (J+1)$, что требует только $(J+1)^3$ комплексных умножений вместо N^3 для ПААР. Число вычислительных операций, требуемых для оценки ковариационной матрицы АР, также значительно сокращается. Если используется

алгоритм SMI, то число временных выборок для оценивания матрицы $N \times N$ составляет $2N$ для оптимальной эффективности в пределах 3 дБ от (9), что для A^2 сводится к $2(J + 1)$ временных выборок.

Эта экономия вычислительных операций достигает больших значений для больших АР с $N \leq 50$ —100. Для АР ККС с 16—32 элементами эта экономия достигает 5—10 раз. Все же наиболее важным преимуществом модели A^2 следует считать тот факт, что структура БЛ и усиление в главном лепестке ДН ААР не деградируют как в случае модели ПААР, что показано на рисунках, построенных по результатам моделирования. Деграция структуры главной ДН и БЛ представляет серьезную проблему, когда есть мощные перемежающиеся короткие помехи от РЛС, при которых компенсационные петли в ПААР просто не успевают обрабатывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальный учет специфики работы АР СНРС в условиях помех обуславливает использование для их компенсации алгоритма типа «адаптив—адаптив» или A^2 , с помощью которого значительно сокращаются и экономятся вычислительные средства по аппаратуре и программному обеспечению; устраняется ряд недостатков полностью адаптивной процедуры, применяемой к АР (таких как деграция структуры главного и боковых лепестков АР). Техника A^2 относится в теории адаптивных антен-

ных решеток к классу подоптимальных, тем не менее для АП GPS модель A^2 близка к оптимальной по некоторым инженерным критериям, таким как точность местоопределения, отношение сигнала к помехе и затраты на реализацию.

1. Ломан В. И., Комаров В. М., Нестеренко И. К. Адаптивные антенные решетки в системах широкополосной связи // Зарубежная радиоэлектроника.—1983.—№ 5.—С. 3—23.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. — М.: Радио и связь, 1986.
3. Проект поправки AN 7/1-99-95 к Т. I Приложения 10 SARPS и инструктивный материал для Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS). — Монреаль: ICAO, 1999.
4. Applebaum S. P. Adaptive Arrays // IEEE Trans. AP-24.—1976.—N 5, Sept.—P. 585—598.
5. Jablon N. K. Adaptive Beamforming with the Generalized Sidelobe Canceller in presence of Array Imperfection // IEEE Trans. AP-34.—1986.—N 8, Aug.—P. 996—1012.

ADAPTIVE DISTURBANCE COMPENSATION FOR SATELLITE RADIO-NAVIGATION SYSTEMS

E. T. Skoryk, A. V. Kriukov

It is analyzed the problem to ensure the antijamming of users equipment of satellite radio-navigation system (SRHS) based on the adaptive suppression of the active disturbance in a zone of SRHS application by responsible users (aviation, navy, power structures and others). It is suggested the algorithm of two-stage adaptive disturbance suppression (algorithm «adaptive-adaptive» or A^2). This algorithm, as analysis shiws, gives a considerable economy of the technical and program means (for some conditions — till two orders) in comparison with algorithm of the completely adaptive antenna arrays.