

УДК 621.396.99

А. В. Немов
АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург)
Данг Ле Минь
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
Д. Ю. Тюфтяков
ЗАО "Конструкторское бюро навигационных систем" (Санкт-Петербург)

Применение метода главных компонент для компенсации помех при приеме сигналов глобальной навигационной спутниковой системы

Для адаптивного управления пространственной избирательностью цифровой антенной решетки (ЦАР) использована разновидность метода главных компонент. Компенсация помех в ЦАР, включенной в состав аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, производится взвешиванием вектора принимаемых колебаний вектором весовых коэффициентов (ВВК). Для формирования ВВК используются собственные числа и векторы шумового подпространства собственной системы оценки корреляционной матрицы принятых колебаний. ВВК адаптируется по критерию минимизации мощности процесса суммарных колебаний на выходе ЦАР или по критерию минимизации нормы ВВК при ограничениях на уровни диаграммы направленности в выбранных направлениях. Предложен комплексный критерий качества и проведен анализ эффективности методов компенсации помех.

Цифровая антенная решетка, пространственно-временная обработка сигналов, компенсация радиопомех, главные компоненты, собственная система, корреляционная матрица, ГНСС

Недостаточная надежность решения навигационной задачи в силу низкой помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей (НАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также аппаратуры контрольно-корректирующих станций и центров управления обусловлена крайне малым энергопотенциалом системного сигнала навигационного космического аппарата (НКА) в приземной области приема. В частности, для ГНСС ГЛОНАСС и GPS мощность системного сигнала на выходе стандартной приемной антенны согласно интерфейсным контрольным документам составляет -161 дБВт. Помехоустойчивость НАП ГНСС общего назначения не превосходит $31...34$ дБ [1], поэтому шумоподобная радиопомеха с мощностью на входе стандартной антенны НАП в полосе приема -127 дБВт (10^{-127} Вт) приводит к невозможности захвата системных сигналов НКА. Такая помеха легко может быть обеспечена при радиопротиводействии [1] или даже из хулиганских побуждений.

Наиболее эффективный метод фильтрации широкополосных и любых иных мощных радиопомех (далее помех) основан на применении по-

давителей (компенсаторов) помех на базе цифровой антенной решетки (ЦАР), реализующих цифровые алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов (фильтрации) [2]. Под ЦАР понимается совокупность аппаратных, программных средств и математических операций над оцифрованными сигналами. Цель пространственно-временных алгоритмов – формирование нулей (минимумов) диаграммы направленности (ДН) ЦАР в направлениях на источники помех.

Виртуальная настройка ДН происходит автоматически и заключается в формировании вектора весовых коэффициентов (ВВК). Набор элементов ВВК однозначно определяет форму настроенной ДН. Скалярный выходной процесс ЦАР формируется в результате свертки ВВК с вектором оцифрованных входных сигналов, принимаемых радиоприемным устройством (РПУ) ЦАР. На выходе ЦАР помеховые колебания скомпенсированы. Набор элементов ВВК однозначно определяет форму настроенной ДН.

Распространенные на практике так называемые слепые, алгоритмы пространственно-временной фильтрации [1], [2] работают по критерию минимизации мощности выходных колебаний ЦАР в

заданных направлениях при выбранных ограничениях на уровни ДН и используют для формирования ВВК непосредственно оценку корреляций в пространственно-временном фильтре. Выходным сигналом ЦАР является процесс на выходе такого фильтра. Недостаток указанных алгоритмов проявляется в том, что в них не учитывается информация о количестве источников помех. В результате количество нулей ДН может не совпасть с количеством помех, а области нулей расширяются. При небольшом пространственном разнесении источников системного сигнала и помехи из-за расширения области нуля ДН падает отношение мощности системного сигнала к собственному шуму НАП (отношение "сигнал/шум" – ОСШ). Этот эффект может привести к невозможности захвата НАП системного сигнала или к потере слежения, поскольку увеличение отношения "сигнал/помеха + шум" при компенсации помех окажется недостаточным.

Улучшить ОСШ на выходе ЦАР при приеме сигналов НКА с близких к источникам помех направлений или, что то же самое, расширить рабочую область ГНСС по пространству [3] можно на основе неклассических подходов к компенсации помех. Эти методы используют для формирования ВВК вместо оценки корреляционной матрицы принимаемых колебаний главные компоненты разложения по собственной системе этой матрицы [4], [5], разделенной на шумовое и сигнальное подпространства. В основу компенсации помеховых колебаний положено свойство ортогональности собственных векторов, соотнесенных подпространствам шума и сигналов. Однако из известной литературы [1], [2], [6] получить непротиворечивое представление об эффективности неклассических методов затруднительно.

Пространственно-временные алгоритмы фильтрации помех рассмотрены далее с позиции пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС).

В качестве комплексного показателя качества работы ЦАР может выступать набор двух критериев: коэффициент подавления мощности помех в ЦАР S_{Π} (отношение мощностей внутриволновых помех на антенном входе и на выходе ЦАР) и доля рабочего пространства ГНСС, оставшаяся после подавления помех (отношение телесного угла, в котором возможен прием сигналов НКА с требуемым качеством, к телесному углу верхней полусферы 180°) [3].

Алгоритмы минимизации мощности процесса суммарных колебаний на выходе ЦАР с линейными ограничениями на уровни ДН в

заданных направлениях. Критерием настройки (адаптации) ЦАР является достижение экстремума целевой функции, описывающей зависимость целевой функции от различных параметров процедуры адаптации.

Ограничения на значения нормированной ДН в направлениях на β НКА имеют вид

$$F(\theta_{\nu}) = C^T \mathbf{W} = \mathbf{B}, \quad (1)$$

где θ_{ν} ($\nu = 1 \dots \beta$) – направления, на которых накладываются ограничения; C – матрица с размерами $M \times \beta$, задающая линейные ограничения на β НКА для M резонаторов физически реализуемой АР; \mathbf{W} – ВВК длины M ; \mathbf{B} – единичный вектор-столбец длины β с элементами, имеющими значения 1 или 0; "Т" – символ транспонирования.

Критерий минимизации выходной мощности Y^2 АФАР описывается выражением

$$O = \min_{\mathbf{W}} Y^2 = \min_{\mathbf{W}} [\mathbf{W}^H (R_{\Pi} + R_{\text{III}}) \mathbf{W}], \quad (2)$$

где R_{Π} , R_{III} – известные корреляционные матрицы принимаемых колебаний помех и собственных шумов НАП соответственно; "H" – символ эрмитова сопряжения. При отсутствии временной фильтрации матрицы R_{Π} и R_{III} имеют размеры $M \times M$.

Оптимальный ВВК, соответствующий минимуму мощности выходного процесса, в предположении несмещенности входных процессов записывается в следующем виде [2]

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = c (R_{\Pi} + R_{\text{III}})^{-1} \mathbf{W}_0, \quad (3)$$

где c – постоянное число; \mathbf{W}_0 – начальный ВВК. От корреляционной матрицы системных сигналов R_c оптимальный ВВК не зависит.

Поскольку для ГНСС характерен высокий (15...30 дБ) обратный контраст по мощности системных сигналов и собственных шумов, в целях компенсации мощных (с не меньшим контрастом) помех можно использовать пространственную корреляционную матрицу принимаемой смеси колебаний без устранения системных сигналов:

$$R = R_c + R_{\text{III}} + \sum_{l=1}^{\beta_{\Pi}} R_{\Pi l}, \quad R = \mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^H,$$

где β_{Π} – количество помех; \mathbf{X} – вектор-столбец комплексных амплитуд входной смеси колебаний длины M .

Тогда при времени наблюдения $t_H \rightarrow \infty$ оптимальный ВВК (3) определяется как

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\text{opt}} &= \min_{\mathbf{W}} \left\{ \overline{(\mathbf{W}^H \cdot \mathbf{X}) \cdot (\mathbf{W}^H \cdot \mathbf{X})^H} \right\} = \\ &= \min_{\mathbf{W}} \left\{ \overline{\mathbf{W}^H \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^H \cdot \mathbf{W}} \right\} = \min_{\mathbf{W}} \left\{ \mathbf{W}^H \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{W} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение для рекуррентного расчета оптимального ВВК (4) и описание традиционного алгоритма минимизации мощности (minimum power – MP) (компенсации помех) при линейных ограничениях на уровни ДН, использующего оценку \bar{R} корреляционной матрицы по ограниченной во времени выборке, приведено в [2].

При указанном ранее характерном для ГНСС условии высокого обратного контраста сигналов относительно помех алгоритмы, синтезированные по критерию (2) при ограничениях (1), сравнительно легко технически реализуются и дают высокие результаты подавления помех. Этому критерию наряду с алгоритмом MP удовлетворяет и представленный далее неклассический алгоритм минимизации мощности с учетом разложения ковариационной матрицы по собственной системе (minimum power eigencanceller – MPE). Наряду с ними рассмотрен неклассический алгоритм минимизации нормы ВВК с учетом разложения по собственной системе (minimum norm eigencanceller – MNE).

Структура общего для всех трех алгоритмов пространственно-временного фильтра представлена на рис. 1. В каждом канале обработки для

увеличения количества степеней свободы в дополнение к пространственной фильтрации функционирует настраиваемый фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) порядка K , обеспечивающий временную фильтрацию.

Компенсация помех заключается в формировании нулей ДН АР или ЦАР в направлениях помех с помощью ВВК \mathbf{W} , который с учетом M элементов АР и порядка K временного фильтра может быть представлен в виде

$$\mathbf{W} = [w_{11}, \dots, w_{1M}, \dots, w_{k1}, \dots, w_{kM}, \dots, w_{K1}, \dots, w_{KM}]^T. \quad (5)$$

Вектор входной смеси комплексных сигналов в этих условиях имеет аналогичный вид:

$$\mathbf{X} = [x_{11}, \dots, x_{1M}, \dots, x_{k1}, \dots, x_{kM}, \dots, x_{K1}, \dots, x_{KM}]^T.$$

Сигнал на выходе фильтра (рис. 1) описывается следующим выражением:

$$y(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_m(n-k+1) w_{km}^*,$$

где n – дискретные временные отсчеты.

В матрично-векторной форме сигнал на выходе фильтра описывается выражением $y(n) = \mathbf{W}^H(n) \cdot \mathbf{X}(n)$.

Для упрощения целесообразно использовать режим без сопровождения полезного сигнала. Тогда условие оптимизации ВВК ПВОС алгоритма MP в матричном виде определено формулой (2) при ограничении (1), если в выражения подставить ВВК (5) с усложненной структурой и по

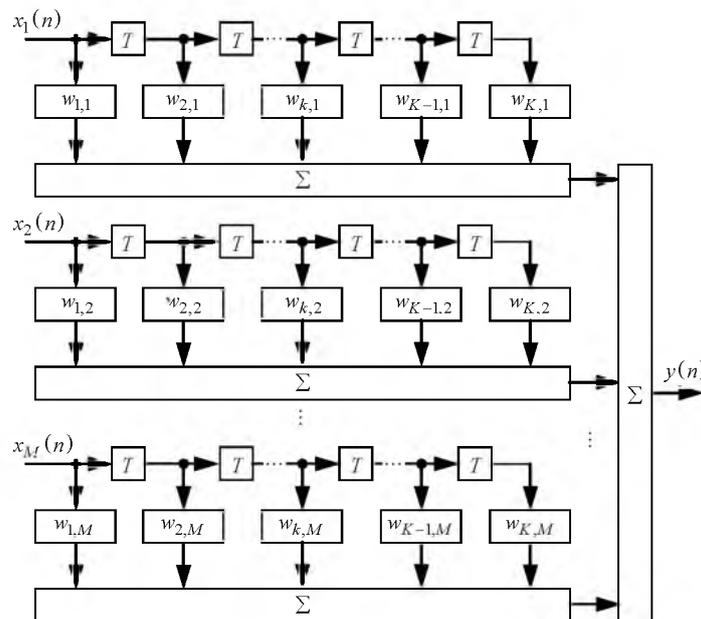


Рис. 1

аналогии векторы \mathbf{X} , \mathbf{B} , содержащий β элементов, и матрицу C с размерами $KM \times \beta$, а \mathbf{W}_{opt} получить из (4). В этом случае ограничение (1) задает начальные значения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) КИХ-фильтров и уровней ДН ЦАР [2], матрица R имеет размеры $KM \times KM$.

Далее описаны ПВОС-алгоритмы подавления помех [6], использующие разложение корреляционной матрицы принятых ЦАР сигналов $R = \overline{\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^H}$, $t_H \rightarrow \infty$ по собственной системе. Разложение представим в виде [7] $R = Q \cdot \Lambda \cdot Q^H$, где Q – унитарная матрица соответствующих им собственных векторов; Λ – диагональная матрица собственных чисел, расположенных в порядке убывания. Алгоритм разложения комплексной матрицы R основан на трансформации Хаусхолдера с целью приведения к bidiagonalной форме, что позволяет найти собственные числа bidiagonalной матрицы с помощью QR -алгоритма.

Для подавления помех используется свойство взаимной ортогональности собственных векторов, соответствующих сигнальному подпространству и шумовых собственных векторов. В данном случае под сигналами подразумеваются помехи, поскольку мощности сигналов НКА по отношению к собственным шумам НАП и помехам пренебрежимо малы. Следовательно, если ВВК \mathbf{W} выбрать из области шумового подпространства, то при сворачивании с вектором принятых ЦАР колебаний \mathbf{X} по формуле $y(t) = \mathbf{W}^H \cdot \mathbf{X}(t)$ помехи будут скомпенсированы.

В вычислениях используется оценка \hat{R} корреляционной матрицы R . При использовании фильтра со структурой по рис. 1 в случае независимых источников помех \hat{R} имеет KM собственных чисел, из которых не более $K + M - 1$ наибольших соответствуют сигнальному подпространству. Пусть Γ – диагональная матрица (с размерами $KM \times KM$) величин, обратных собственным числам матрицы \hat{R} . Выделим из Γ диагональную матрицу Γ_{III} с размерами $(KM - \beta_{\text{II}}) \times (KM - \beta_{\text{II}})$, соответствующую шумовым собственным числам, где $\beta_{\text{II}} \leq K + M - 1$ – количество помех.

После выделения матрицы Γ_{III} из матрицы Q формируется матрица векторов Q_{III} , соответствующих шумовому подпространству. Из критерия минимизации выходной мощности ЦАР

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \min_{\mathbf{W}} \{ \mathbf{W}^H \cdot R \cdot \mathbf{W} \}$$

при линейных ограничениях на ортогональность собственных векторов: $Q_{\text{III}}^H \cdot \mathbf{W} = \mathbf{0}$ ($\mathbf{0}$ – нулевой вектор-столбец длины $KM - \beta_{\text{II}}$) и на АЧХ фильтров и ДН АВР: $C^T \cdot \mathbf{W} = \mathbf{B}$ (\mathbf{B} – вектор-столбец длины β) определяется оптимальный ВВК алгоритма МРЕ в виде [6]

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = Q_{\text{III}} \cdot \Gamma_{\text{III}} \cdot Q_{\text{III}}^H \cdot C \times (C^H \cdot Q_{\text{III}}^H \cdot \Gamma_{\text{III}} \cdot Q_{\text{III}}^H \cdot C)^{-1} \cdot \mathbf{B}. \quad (6)$$

Длина временной выборки колебаний \mathbf{X} не должна быть менее $M + K - 2$.

Алгоритм (4) при малом угловом разнесении источников помех в системе координат ДН позволяет сформировать более острые нули ДН по сравнению с традиционным ПВОС-алгоритмом.

Если изначально количество β_{II} неизвестно, для формирования Γ_{III} размер шумового подпространства необходимо оценить. Однако алгоритмы оценки, например по критерию Акаике (Akaike information criterion – AIC) или по максимуму правдоподобия [8], [9], недостаточно эффективны при априорной неопределенности относительно коррелированности колебаний генераторов сигналов и до настоящего времени не до конца изучены.

Иной критерий адаптации (MNE) состоит в минимизации нормы весового вектора $\mathbf{W}_{\text{opt}} = \min_{\mathbf{W}} \{ \mathbf{W}^H \cdot \mathbf{W} \}$ при прежних ограничениях: $Q_{\text{III}}^H \cdot \mathbf{W} = \mathbf{0}$; $C^T \cdot \mathbf{W} = \mathbf{B}$. Оптимальный ВВК алгоритма MNE описывается выражением

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = Q_{\text{III}} \cdot Q_{\text{III}}^H \cdot C \cdot (C^H \cdot Q_{\text{III}} \cdot Q_{\text{III}}^H \cdot C)^{-1} \cdot \mathbf{B}. \quad (7)$$

Из сравнения (6) и (7) видно, что в отсутствие помех при "белом" собственном шуме аппаратуры ЦАР, т. е. когда $\Gamma_{\text{III}} = (1/\sigma_{\text{III}}^2)I$, алгоритмы МРЕ и MNE совпадают (σ_{III} – среднеквадратическое отклонение шумов; I – единичная матрица).

Основное отличие алгоритмов (6) и (7) от традиционного МР-алгоритма заключается в том, что оптимальные ВВК этих методов ортогональны шумовому подпространству, в то время как для традиционного МР-алгоритма ортогональность не требуется.

Можно показать, что весовой вектор (5) более устойчив к ошибкам в оценке корреляционной матрицы \hat{R} , чем (4). ВВК (6) не обладает робастностью ВВК (7).

Структура компенсатора помех. На рис. 2 приведена структурная схема НАП ГНСС (на примере четырехэлементной ЦАР) с повышенным уровнем помехоустойчивости, реализующая описываемые алгоритмы компенсации помех. Компенсация осуществляется управлением ДН с виртуальным формированием нулей в направлении источников помех.

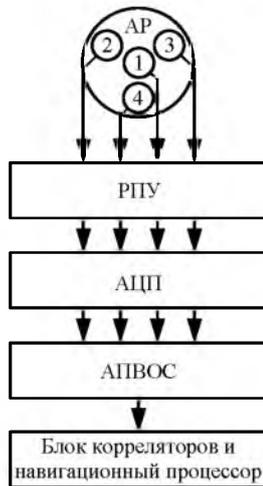


Рис. 2

Проследим прохождение сигнала по тракту обработки сигналов НАП. Радиосигнал принимается четырехэлементной АР. Принятые колебания с резонаторов 1–4 поступают на радиоприемное устройство РПУ, где они переносятся на промежуточную частоту, усиливаются и фильтруются. Далее сигналы оцифровываются в АЦП, переносятся на видеочастоту квадратурным детектором КД и "выбеливаются" в устройстве адаптивной пространственно-временной цифровой обработки сигналов АПВОС, формирующем виртуальные нули ДН и лучи в направлениях, полученных в результате работы описанных ранее алгоритмов за счет наложения линейных ограничений на ДН. В блоке корреляторов и в навигационном процессоре формируется навигационное решение. Тракт обработки сигналов ЦАР в целом формирует нули ДН АР.

Результаты имитационного моделирования алгоритмов компенсации помех. Вследствие высокой сложности аналитических расчетов количественная оценка качества функционирования алгоритмов получена на программной модели в среде инженерных расчетов MATLAB. Идеализация модели заключалась в принятии следующих допущений:

- источники помех принимаются точечными;
- многоходовость сигналов отсутствует;
- резонаторы АР не влияют друг на друга;
- приемный тракт линеен;
- фильтры каналов приемного тракта идентичны.

На рис. 3–5 представлены проекции сечений ДН семиэлементной ЦАР ($M = 7, K = 1$) плоскостями, параллельными плоскости АР, полученные в ходе адаптации по критерию минимума мощности (МР), минимума мощности с ограничением на ортогональность (МРЕ) и минимума нормы с ограничением на ортогональность (МНЕ) (φ – азимут). Маркером "+" в центре диаграмм показано направление максимума ДН до начала работы алгоритмов (направление на НКА). "Звездочками" показаны точки расположения источников помех. ДН нормированы на значение максимума до начала адаптации. Нулям ДН соответствуют сгущения линий сечения ДН, а направлениям наибольшей чувствительности (лучам) – области разряжения.

В первом случае (рис. 3) угол азимута помехи равен 90° , а дополнительный угол места составляет 85° . На рис. 4 приведены результаты для случая, когда два источника помех разнесены по углу азимута на 10° , а их дополнительные углы места равны 85° . В последнем случае (рис. 5) действуют равномерно распределенные по азимуту 6 помех с дополнительными углами места, равными $75, 75, 80, 80, 82$ и 85° (практически в плоскости горизонта).

Из рис. 3–5 следует, что форма нулей и лучей ДН для различных алгоритмов при одинаковых начальных условиях может варьироваться, в том числе формируются дополнительные (паразитные) нули и лучи.

В таблице приведены размеры рабочей зоны ГНСС (область видимости НКА, сигналы которых остались пригодными для решения навигационной задачи после компенсации помех) в процентах от всей области видимости для рассмотренных алгоритмов в ситуациях рис. 3–5. Анализируя полученные результаты, можно заключить, что размер рабочей зоны наиболее деградирует для алгоритма МРЕ.

На рис. 6 представлены частотные зависимости коэффициента подавления помех в рассмотренных помеховых ситуациях. Мощность помех в полосе обработки сигналов по отношению к мощности собственных шумов НАП выбрана равной 60 дБ. Цифровая обработка сигналов в рассмотренном случае производится в комплексной области после дискретизации выходного сигнала РПУ с частотой выборки 45 МГц в полосе 17 МГц и переноса дискретного спектра на видеочастоту в КД АПВОС. В связи с этим на рис. 6 представлен комплексный спектр коэффициента подавления, являющегося действительной величиной. В интер-

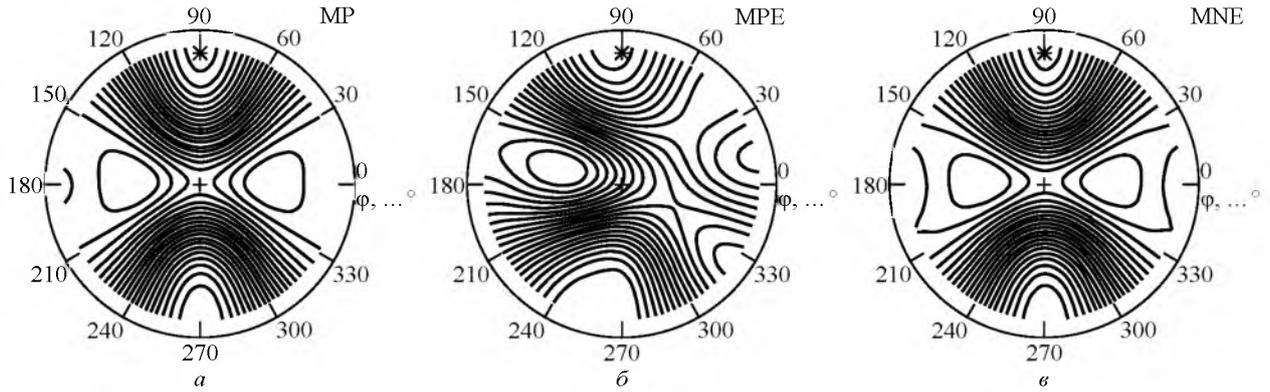


Рис. 3

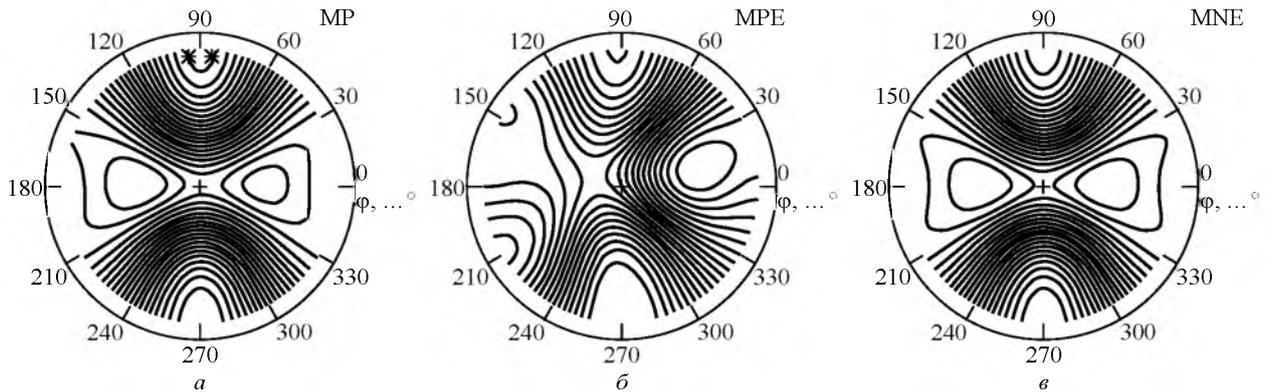


Рис. 4

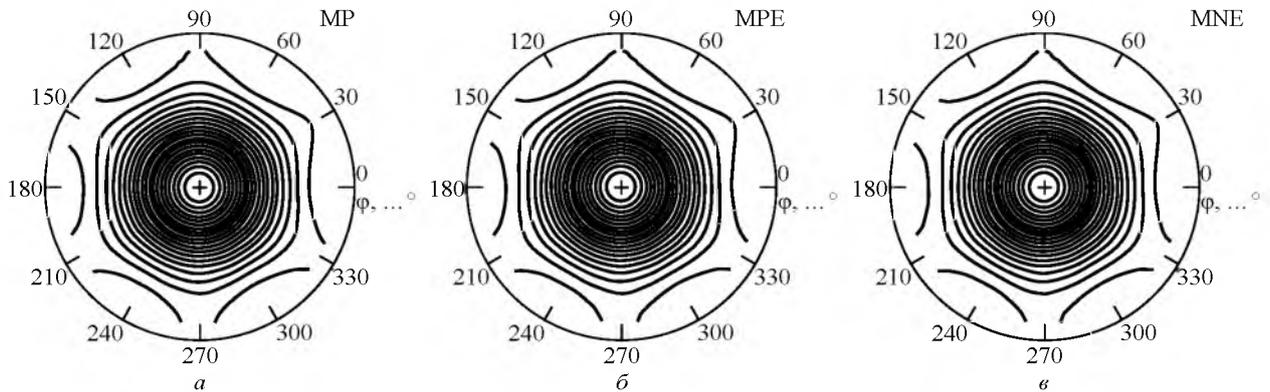


Рис. 5

Количество помех	Алгоритм		
	MP	MPE	MNE
	Рабочая зона, %		
1	79	62	80
2	78	55	80
6	43	43	43

тервале 8.5...36.5 МГц значение коэффициента подавления интереса не представляет, поскольку данная область соответствует полосе режекции фильтра нижних частот, входящего в состав КД для подавления спектра вне единичного значения "полуокна" Найквиста, а также остатков внеполос-

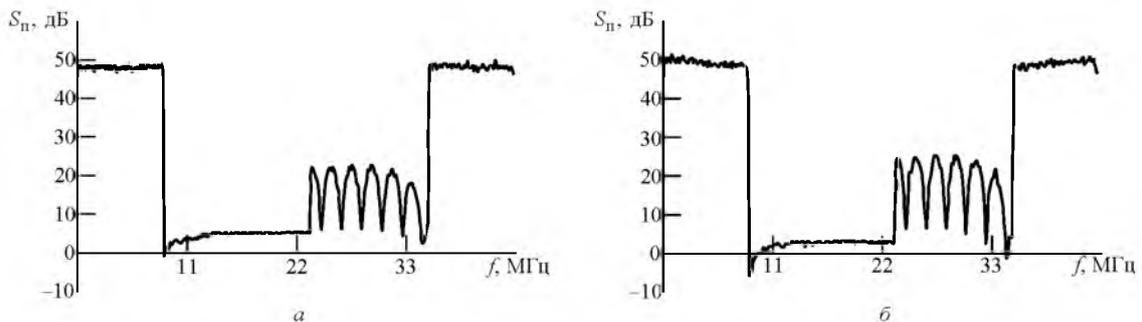


Рис. 6

ных помех. В остальном частотном интервале при двух источниках помех все алгоритмы показали близкие результаты, представленные на рис. 6, а. При действии шести источников помех (рис. 6, а) результаты для методов МРЕ и МНЕ совпадают принципиально. Это связано с тем, что размерность шумового подпространства равна единице, и поэтому формулы (6) и (7) становятся идентичными.

Представленное рассмотрение показывает, что МР-алгоритм, синтезированный в рамках классического подхода, и неклассические алгоритмы МРЕ и МНЕ, использующие собственную систему корреляционной матрицы, имеют близкие количественные характеристики по подавлению помех.

Алгоритм МНЕ при подавлении помех обеспечивает незначительно большую рабочую об-

ласть ГНСС по отношению к работе алгоритмов МР и МРЕ.

Указанные в зарубежной литературе [6] преимущества неклассических методов компенсации помех как с точки зрения увеличения степени подавления мощности помех, так и расширения рабочей зоны ГНСС, не очевидны. Как минимум, неклассические алгоритмы практически не уступают классическому методу МР. Однако для уверенного вывода о предпочтительности неклассических алгоритмов необходимо экспериментальное исследование, поскольку модель может не учитывать нюансы реальной помеховой ситуации и свойств реального приемного тракта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немов А. В. Цифровые антенные решетки: новое качество спутниковых радионавигационных систем. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 159 с.
2. Гейбриел У. Введение в теорию адаптивных антенных решеток // ТИИЭР. 1976. Т. 64, № 2. С. 55–95.
3. Немов А. В. Рабочие зоны глобальных навигационных спутниковых систем при использовании подавителей помех // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 6. С. 44–49.
4. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвоян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
5. Jolliffe I. T. Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics, 2nd ed. New York: Springer, 2002. 487 p.
6. Haimovich A. E. The Eigencanceler: Adaptive Radar by Eigenanalysis Methods // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1996. Vol. AES-32, № 2. P. 532–542.
7. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
8. Wax M. Detection of Signal by Information Theoretic Criteria // IEEE Trans. Acoustic, Speech, and Signal Processing. 1985. Vol. ASSP-33, № 4. P. 387–392.
9. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification // IEEE Trans. Autom. Control. 1974. Vol. AC-19, № 6. P. 716–723.

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2017 г.

Для цитирования: Немов А. В., Данг Ле Минь, Тюфтяков Д. Ю. Применение метода главных компонент для компенсации помех при приеме сигналов глобальной навигационной спутниковой системы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 16–23.

Немов Андрей Васильевич – кандидат технических наук (1989), старший научный сотрудник (1996), руководитель проектного направления АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая радионавигация; системы посадки; фазированные антенные решетки.

E-mail: an.nilov2011@yandex.ru

Данг Ле Минь – магистр техники и технологий по направлению "Телекоммуникации" (2006, Вьетнам), инженер Вьетнамской академии наук и технологий, аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радионавигация; пространственно-временная обработка сигналов.

E-mail: leminh2882@gmail.com

Тюфтяков Дмитрий Юрьевич – магистр техники и технологий по направлению "Телекоммуникации" (2008), ведущий инженер ЗАО "КБ "НАВИС" (Санкт-Петербург). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая навигация; пространственно-временная обработка сигналов.

E-mail: d.tyufyakov@gmail.com

A. V. Nemov

JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg)

Dang Le Minh

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

D. Yu. Tyufiyakov

JSC "Design Bureau NAVIS" (Saint Petersburg)

Application of the Main Components Method for GNSS Interference Suppression

Abstract. In this paper three methods of interferences nulling for GNSS GPS or GLONASS are described. A digital antenna array for compensation of interferences is implied. Two methods are based on the eigenvector decomposition of the correlation matrix of received oscillations. An expansion of the correlation matrix on its eigensystem is applied. The eigenvector matrix must be divided on the noise and signal subspaces. Some main components of the eigenvector matrix are used to weight vector calculation. The structure of a space-time interferences compensator is shown. The comprehensive test and the comparative analysis of effectiveness of described methods with the classic gradient method of output fluctuation power minimize under restriction on radiation pattern are completed. A suppression coefficient ranges up to 60 dB.

Key words: Digital Antenna Array, Space-Time Signal Processing, Interference Compensation, Main Components, Eigen System, Correlation Matrix, GNSS

REFERENCES

1. Nemov A. V. *Tsifrovye antennye reshetki: novoe kachestvo sputnikovyykh radionavigatsionnykh system* [Digital antenna arrays: a new quality of satellite radio navigation systems]. Saint Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 159 p. (In Russian)
2. Gabriel W. F. Adaptive Arrays – an Introduction. *Pros. of the IEEE*. 1976, vol. 64, no. 2, pp. 239–272.
3. Nemov A. V. Working zones of global navigational satellite systems using the suppressors in the fur. *Izvestiya Vuzovii Radioelektronika*. 2014, no. 6, pp. 44–49. (In Russian)
4. Aivozyan S. A., Bukhshtaber V. M., Enyukov I. S., Meshalkin L. D. *Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* [Applied statistics. Classification and Dimension Reduction]. Moscow, *Finansy i statistika*, 1989, 607 p. (In Russian)
5. Jolliffe I. T. *Principal Component Analysis*, Series: Springer Series in Statistics, 2nd ed. New York, Springer, 2002, 487 p.
6. Haimovich A. E. The Eigencanceler: Adaptive Radar by Eigenanalysis Methods. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 1996, vol. AES-32, no. 2, pp. 532–542.
7. Marple S. L., Jr. *Digital spectral analysis with applications*. New Jersey, Prentice Hall, Inc., 1987, 492 p.
8. Wax M. Detection of Signal by Information Theoretic Criteria. *IEEE Trans. Acoustic, Speech, and Signal Processing*. 1985, vol. ASSP-33, no. 4, pp. 387–392.
9. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1974, vol. AC-19, no. 6, pp. 716–723.

Received February, 17, 2017

For citation: Nemov A. V., Dang Le Minh, Tyufiyakov D. Y. Application of the Main Components Method for GNSS Interference Suppression. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 16–23. (In Russian)

Andrey V. Nemov – Ph.D. in Engineering (1989), senior researcher of JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg). The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: satellite radio navigation; landing systems; phased array systems.

E-mail: an.nilov2011@yandex.ru

Dang Le Minh – Master of engineering and technology in "Telecommunications" (2006, Vietnam), engineer of Vietnam Academy of science and technology, postgraduate student of the Department of radio systems of Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI". Area of expertise: radio navigation; space-time signal processing.

E-mail: leminh2882@gmail.com

Dmitry Yu. Tyufiyakov – Master of engineering and technology in "Telecommunications" (2008), leading engineer of JSC "Design Bureau NAVIS" (Saint Petersburg). The author of 15 scientific publications. Area of expertise: satellite radio navigation; space-time signal processing.

E-mail: d.tyufiyakov@gmail.com