

УДК 621.396.9

А. В. Немов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Рабочие зоны глобальных навигационных спутниковых систем при использовании подавителей помех

Представлена методика расчета рабочих зон глобальных навигационных спутниковых систем, основанная на вычислении энергетического потенциала принимаемого системного сигнала на фоне действия источников помех и собственных шумов приемных каналов. Помеховые сигналы подавляются цифровой адаптивной антенной решеткой. Приведены примеры расчета рабочих зон при двух конфигурациях приемных антенных решеток навигационной аппаратуры потребителей в различных помеховых ситуациях.

Помехоустойчивость, подавитель помех, рабочая зона ГНСС

Низкая помехоустойчивость и высокая уязвимость глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) к действию помех, объясняемая главным образом малой мощностью принимаемых сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) в приземной области ($-161 \dots -168$ дБВт), вынуждает использовать подавители помех (ПП). Наиболее эффективные современные ПП [1] представляют собой приемную антенную решетку (АР) и аппаратно-программные средства адаптивной обработки пространственно-временной информации, объединение которых формирует адаптивные фазированные цифровые антенные решетки (ЦАР) [2], [3].

Как известно [1], для решения навигационной задачи в трехмерном пространстве с помощью ГНСС необходим одновременный прием сигналов не менее четырех НКА с различных направлений при удовлетворительном энергетическом потенциале (ЭП) каждого аппарата, который должен быть не ниже $27 \dots 30$ дБГц. Поэтому при использовании ПП в конечном итоге наиболее важными являются энергетические условия приема сигналов созвездия НКА, обеспечиваемые для защищаемой навигационной аппаратуры потребителя (НАП), в состав которой входит ПП или входной сигнал которой "очищается" от помех с помощью ПП.

Подавление помех заключается в адаптации характеристики направленности (ХН) ЦАР так, чтобы в процессе адаптации в направлениях на источники помех формировались минимумы модуля этой характеристики. Под ХН понимается зависимость выходного напряжения сфокусированной в определенных направлениях и настроенной на подавление

помех ЦАР от углового положения точечного источника пробного сигнала. В общем случае ХН является комплексной. Далее будем рассматривать модуль ХН – диаграмму направленности (ДН) ЦАР. ДН строится с учетом воздействия помех и полезных сигналов. Будем считать, что АР экранирована от подстилающей поверхности.

Наличие минимумов ДН ЦАР сказывается на ЭП принимаемых сигналов НКА. Поэтому качество определения местоположения существенно зависит от направлений прихода фронтов радиоволн от НКА и источников помех (которые задаются азимутом φ и дополнительным углом места θ). Фактически это означает, что в некоторых направлениях не выполняется критерий удовлетворительности ЭП. Поэтому представляет интерес определение области пространства (рабочей зоны), приходящие из которой сигналы НКА создают удовлетворительный ЭП для приемника ГНСС определенного класса. Может быть поставлена и альтернативная задача: определение нерабочей зоны – области верхнего полупространства, в которой при работе в приземной области решение навигационной задачи невозможно либо определение координат производится с недопустимо низким качеством. Величина рабочей (или нерабочей) зоны является одной из наиболее информативных характеристик при определении качества помехоподавителя и работы НАП в целом.

В известных подходах [1] определение указанных областей основано на расчете ЭП как отношения "сигнал/помеха" на входе защищаемого приемника в предположении, что пространствен-

¹ Статья подготовлена в рамках выполнения НИР 2.1.1.1 ФРТ проекта 2.1.1 «Проведение НИОКР и решение комплексных проблем по приоритетному направлению "Инфокоммуникационные технологии, телекоммуникации и радиотехнические системы"» на базе профильной научно-образовательной платформы.

ная фильтрация осуществлена. При этом не учитывается, что остатки неподавленных помех, как правило, выбеливаются коррелятором защищаемого приемника и потому действуют практически так же, как его собственные шумы, дополнительно уменьшая точность координатометрии. В результате площадь нерабочей зоны системы, рассчитанная по критерию "сигнал/помеха", занижается.

В настоящей статье представлен другой подход, в котором в качестве ЭП защищаемого приемника и критерия качества ПП рассмотрено выходное обобщенное отношение мощностей "сигнал (S)/(шум (N) + помеха (I))" (ОСШП) на выходе ПП $\Psi_{\text{ВЫХ}} = \left[S / (\sum I + N) \right]_{\text{ВЫХ}}$ или на входе защищаемого приемника НАП. При сканировании пространства и конкретной геометрии расположения НКА это отношение зависит, в том числе, и от значений углов φ и θ источников помех.

Принцип расчета нерабочей зоны. В общем виде расчет нерабочей зоны, понимаемой как часть площади верхней полусферы или соответствующего ей телесного угла, заключается в определении области справедливости неравенства

$$\{S/N\}(\varphi, \theta)_{\text{ВЫХ}} < (S/N)_{\text{пор}}, \quad (1)$$

где $\{S/N\}(\varphi, \theta)_{\text{ВЫХ}}$ – ЭП на выходе подавителя помех; $(S/N)_{\text{пор}}$ – защитное отношение (ЗО), являющееся присущей приемнику характеристикой защищаемой НАП. ЗО определяет относительный уровень сигнала, при котором приемник сохраняет работоспособность, а значит, и уровень подавления помех в защищаемом приемнике, обеспечиваемый его частотно-кодовой избирательностью. При условии, задающем нерабочую зону в виде (1), рабочая зона есть телесный угол, дополняющий нерабочую зону до 180° . Рабочая зона обычно определяется в процентах к телесному углу 180° или отношением ее площади к площади верхней полусферы.

Показатель качества функционирования навигационной аппаратуры потребителя в условиях помех. Отношение Q площади области, соответствующей справедливости неравенства (1), к площади всей верхней полусферы при условии равномерного распределения в ней НКА равно вероятности подавления сигналов от НКА (доле пространства, сигналы помех из которой подавляются, или относительной величине нерабочей области) при заданной сигнально-помеховой ситуации. Относительная величина нерабочей области характеризует вероятность невозможности решения навигационной задачи с заданными параметрами. Относительная величина рабочей обла-

сти дополняет относительную величину нерабочей области до 100 %.

Введенный таким образом показатель качества непосредственно связан с решением системой "ПП – защищаемая НАП" основной задачи по формированию навигационного решения и может использоваться для сравнения различных устройств пространственной обработки сигналов.

Результат расчета величины нерабочей зоны, соответствующей области справедливости неравенства (1), существенно зависит не только от сигнально-помеховой ситуации и качества защищаемого приемника, но и от конкретной геометрии АР и применяемого в ЦАР алгоритма обработки пространственно-временной информации.

Далее в настоящей статье приведены количественные результаты, полученные на примерах наиболее распространенных плоских тетрагональной (квадратной) четырехэлементной и гексагональной семиэлементной компактных АР, схемы которых представлены на рис. 1, *a* и *б* соответственно.

Вектор антенной решетки для четырех- и семиэлементных адаптивных фазированных антенных решеток. Вектор АР $\mathbf{A} = \{a_m\}$ является математической записью ее реакции на пробный сигнал, необходимый для расчета ДН. Его элементы представляют собой множители, приводящие фазы сигналов, принятых каждым приемным элементом (ПЭ) с некоторого направления (φ, θ) , к фазе сигнала, получаемого от первого ПЭ.

Пусть АР расположена в плоскости горизонта, а идеализированная ДН каждого ПЭ ЦАР имеет вид полусферы с радиусом основания R_p , направленной в зенит. Предположим, что все приемные вибраторы или ПЭ ЦАР представляют собой резонаторы с радиусом основания R_p , идентичны по усилению, поляризации и характеристике направленности.

Для четырехэлементной ЦАР (см. рис. 1, *a*) вектор АР $\mathbf{A} = \{a_m(\varphi, \theta)\}$, $m = \overline{1, 4}$, может быть описан следующим образом:

$$\mathbf{A}(\varphi, \theta) = \begin{cases} 1; \\ \exp[j4\pi f_0 (R_p/c) \sin \theta \cos \varphi]; \\ \exp[j4\pi f_0 (R_p/c) (\sin \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi)]; \\ \exp[j4\pi f_0 (R_p/c) \sin \theta \sin \varphi], \end{cases} \quad (2)$$

где f_0 – несущая частота сигнала НКА; c – скорость света.

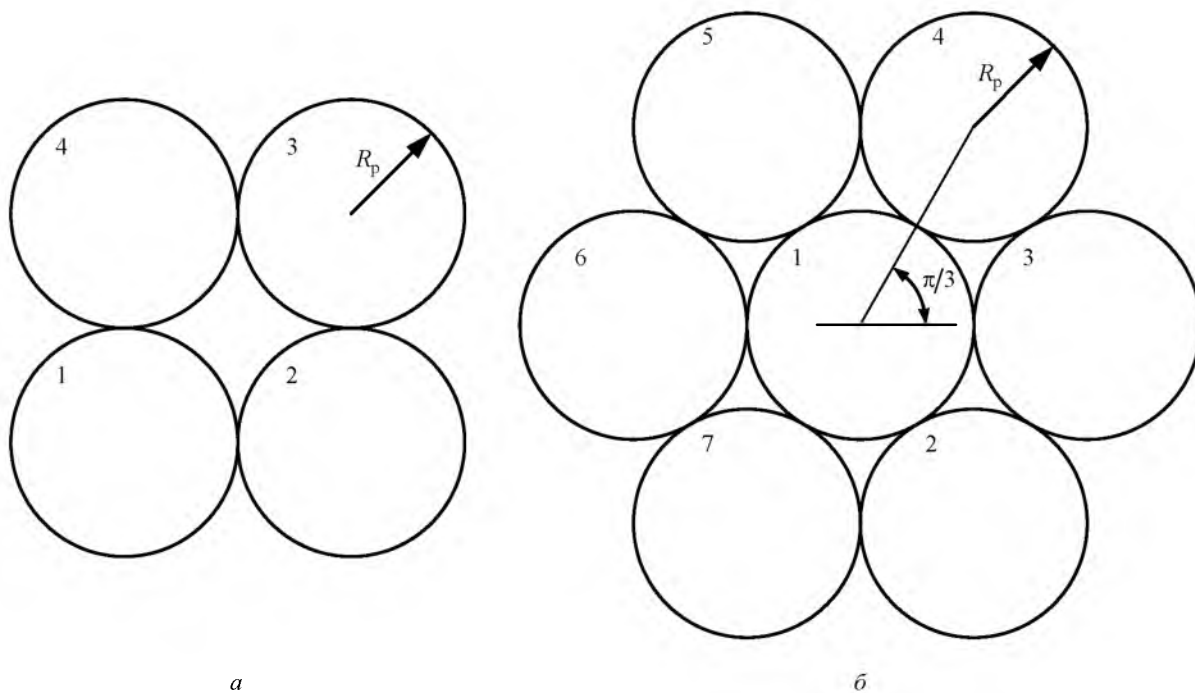


Рис. 1

Для семисегментной АФАР вектор \mathbf{A} , $m = \overline{1, 7}$, имеет вид

$$\mathbf{A}(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} 1; \\ \exp\left[j4\pi f_0 \left(\frac{R_p}{c}\right) \sin \theta \cos(\varphi - \pi/3)\right]; \\ \exp\left[j4\pi f_0 \left(\frac{R_p}{c}\right) \sin \theta \cos \varphi\right]; \\ \exp\left[j4\pi f_0 \left(\frac{R_p}{c}\right) \sin \theta \cos(\varphi + \pi/3)\right]; \\ \exp\left[j4\pi f_0 \left(\frac{R_p}{c}\right) \sin \theta \cos(\varphi + 2\pi/3)\right]; \\ \exp\left[j4\pi f_0 \left(\frac{R_p}{c}\right) \sin \theta \cos(\varphi + \pi)\right]; \\ \exp\left[j4\pi f_0 \left(\frac{R_p}{c}\right) \sin \theta \cos(\varphi + 4\pi/3)\right]. \end{bmatrix} \quad (3)$$

Определение величины нерабочей зоны глобальных навигационных спутниковых систем. Пусть АР принимает смесь полезных сигналов НКА и широкополосных помеховых сигналов. Собственные "квазибелые" шумы приемных каналов приведены ко входам приемных каналов радиочастотных преобразователей (РЧП) и имеют одинаковые параметры. Всего предполагается K точечных источников сигналов (системного сигнала ГНСС и помеховых сигналов).

Для M ПЭ в предположении пространственно-временной узкополосности приемной системы принимаемый вектор-столбец

$$\mathbf{X}(q) = [x_1(q), x_2(q), \dots, x_M(q)]^T$$

смеси принятых вибраторами ЦАР колебаний, усиленных и перенесенных по частоте с помо-

щью M -канального РЧП с общим гетеродином, может быть записан следующим образом:

$$\mathbf{X}(q) = \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{ВХ}}(q) + \mathbf{N}_{\text{кан}}(q),$$

где q – дискретные моменты времени;

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}(\varphi_1, \theta_1), \mathbf{A}(\varphi_2, \theta_2), \dots, \mathbf{A}(\varphi_K, \theta_K)]$$

– матрица с размерами $m \times K$, составленная из векторов приведения фазы \mathbf{A} для каждого источника сигнала;

$$\mathbf{S}_{\text{ВХ}}(q) = [s_{\text{ВХ}1}(q), s_{\text{ВХ}2}(q), \dots, s_{\text{ВХ}M}(q)]^T$$

– вектор входных сигналов отдельных ПЭ ЦАР;

$$\mathbf{N}_{\text{кан}}(q) = [n_{\text{кан}1}(q), n_{\text{кан}2}(q), \dots, n_{\text{кан}M}(q)]^T$$

– вектор собственных шумов на выходах приемных каналов, причем "Т" – символ транспонирования. Собственные шумы предполагаются "квазибелыми".

Сигнал на выходе ПП описывается выражением $y(q) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(q)$, где $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$ – вектор весовых коэффициентов (ВВК), с помощью которого ЦАР адаптируется к конкретной помеховой ситуации; "H" – символ эрмитового сопряжения. При этом скалярные отсчеты комплексных амплитуд полезного сигнала на выходе ПП описываются как

$$s_{\text{ВЫХ}}(q) = \mathbf{W}^H \mathbf{S}_{\text{ВХ}}(q),$$

шум на выходе ПП – как

$$n_{\text{ВЫХ}}(q) = \mathbf{W}^H \mathbf{N}_{\text{КАН}}(q),$$

а амплитуды сигналов помехи – как

$$x_{r_{\text{П.ВЫХ}}}(q) = \mathbf{W}^H \mathbf{x}_{r_{\text{П.ВХ}}}(q),$$

где $\mathbf{x}_{r_{\text{П.ВХ}}}(q)$ – вектор r -й помехи на входе подавителя.

Для расчета нерабочих зон ГНСС при фиксированной помеховой обстановке ВВК адаптируется однократно. Адаптация может производиться различными методами, что не изменяет приведенных далее рассуждений. В настоящей статье применена адаптация элементов ЦАР с помощью градиентного алгоритма минимума среднеквадратической ошибки [3].

В каждый отсчет времени q мощности сигнала $P_{\text{С.ВЫХ}}(q)$, шума $P_{\text{Ш.ВЫХ}}(q)$ и r -й помехи $P_{r_{\text{П.ВЫХ}}}(q)$ на выходе ПП с точностью до одинаковой константы можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} P_{\text{С.ВЫХ}}(q) = s_{\text{ВЫХ}}^*(q) s_{\text{ВЫХ}}(q); \\ P_{\text{Ш.ВЫХ}}(q) = n_{\text{ВЫХ}}^*(q) n_{\text{ВЫХ}}(q); \\ P_{r_{\text{П.ВЫХ}}}(q) = x_{r_{\text{П.ВЫХ}}}^*(q) x_{r_{\text{П.ВЫХ}}}(q), \end{cases} \quad (4)$$

где "*" – символ комплексного сопряжения.

Мощности полезного сигнала, шума и r -й помехи на входе отдельно взятого канала ПП $P_{\text{С.ВХ}}$, $P_{\text{Ш.ВХ}}$ и $P_{r_{\text{П.ВХ}}}$ могут быть рассчитаны аналогично выражению (4).

Градиентный алгоритм подавления помех позволяет формировать лучи ДН в априорно заданных направлениях. Проведенные исследования показали, что эффективно формирование не менее пяти лучей. Для наилучшего обслуживания всех видимых НКА целесообразно расположить лучи под следующими углами: азимут $\varphi = 0, 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ$ и 288° ; дополнительный угол места $\theta = 45^\circ$ для всех лучей.

Для определения параметров нерабочих зон при фиксированном положении лучей необходимо просканировать все пространство, откуда можно принимать сигналы НКА, по углам φ и θ . Сканируемое пространство представляет собой верхнюю полусферу.

Расчеты проведены с шагом сканирования по обеим угловым координатам 0.5° . При сканировании значения ХН ЦАР (для конкретной помеховой ситуации) определяются следующим образом:

$$H(\varphi, \theta) = \mathbf{W}^T \mathbf{A}(\varphi, \theta), \quad (5)$$

где вектор \mathbf{A} задается формулами (2) или (3) в зависимости от конфигурации рассматриваемой ЦАР.

Выражение (5) в случае равновесного (без учета \mathbf{W}) суммирования совпадает с множителем антенной решетки [1] (без учета ХН одиночного ПЭ). В частном случае изотропности ХН элементов АР в верхней полусфере (5) определяет ХН ЦАР в целом.

Пронормировав $H(\varphi, \theta)$, получим

$$H_{\text{Н}}(\varphi, \theta) = \frac{H_{\text{Н}}(\varphi, \theta)}{|H_{\text{Н}}(\varphi_0, \theta_0)|}, \quad (6)$$

где φ_0, θ_0 определяют направление на наиболее сильный полезный (системный) сигнал, если сигналов несколько.

В силу предполагаемой линейности системы реакцию подавителя на полезный сигнал, помеховые и шумовые воздействия при настроенном и при настроенном ВВК можно изучать независимо. Поэтому в качестве критерия используем увеличение ОСШП $\Psi_{\text{ВЫХ}}$ на выходе ПП по отношению к входному ОСШП $\Psi_{\text{ВХ}}$ (обобщенный коэффициент подавления помех L или выигрыш в ОСШП).

По определению (1) рабочие или нерабочие зоны строим, используя ЭП $\{S/N\}(\varphi, \theta)_{\text{ВЫХ}}$. Необходимо определить зависимость между этим отношением и ХН, а также связь с обобщенным коэффициентом подавления L .

При одном НКА, зафиксированном в некоторой точке небосвода, выигрыш в ОСШП (определяемый в децибелах) определится следующим образом:

$$L = \Psi_{\text{ВЫХ}} - \Psi_{\text{ВЫХ}},$$

где

$$\Psi_{\text{ВЫХ}} = 10 \lg \left(\frac{\bar{P}_{\text{С.ВЫХ}}}{\sum_{r=1}^{\beta} \bar{P}_{r_{\text{П.ВЫХ}}} + \bar{P}_{\text{Ш.ВЫХ}}} \right);$$

$$\Psi_{\text{ВХ}} = 10 \lg \left(\frac{\bar{P}_{\text{С.ВХ}}}{\sum_{r=1}^{\beta} \bar{P}_{r_{\text{П.ВХ}}} + \bar{P}_{\text{Ш.ВХ}}} \right),$$

причем β – количество источников помех; двойная черта над величинами означает усреднение по выборке временных отсчетов мгновенных мощностей, одинарная черта – усреднение по статистическим испытаниям. В вычислительном эксперименте, исходя из состоятельности оценок при

экономии вычислительного ресурса, проводилось усреднение 5000 отсчетов по 300 испытаниям.

С учетом (1) минимальный выигрыш в ОСШП, при котором работа защищаемой НАП еще не нарушается, определяется как

$$L_{\min} = \Psi_{\text{пор}} - \Psi_{\text{вх}},$$

где $\Psi_{\text{пор}}$ – ЗО, учитывающее остаток неподавленных помех, определяемое по входу защищаемой НАП.

В пределах нерабочей зоны ОСШП на выходе ПП $\Psi_{\text{вых}}$ как функция направления (φ, θ) должно быть меньше ЗО:

$$\Psi_{\text{вых}}(\varphi, \theta) < \Psi_{\text{пор}}, \quad (7)$$

где левая часть (7) есть ОСШП на выходе ПП, когда источник пробного сигнала расположен в направлении (φ, θ) . Это отношение можно рассчитать, получив значение $\Psi_{\text{вых}}$, когда НКА расположен в максимуме ДН, и умножив его на нормированную ХН АФАР (6):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\overline{\overline{P}}_{\text{с}_{\text{вых}}}}{\sum_{r=1}^{\beta} \overline{\overline{P}}_{\text{п}_{\text{вых}}} + \overline{\overline{P}}_{\text{ш}_{\text{вых}}}} \right) (\varphi, \theta) = \\ & = H_{\text{н}}^2(\varphi, \theta) \left(\frac{\overline{\overline{P}}_{\text{с}_{\text{вых}}}}{\sum_{r=1}^{\beta} \overline{\overline{P}}_{\text{п}_{\text{вых}}} + \overline{\overline{P}}_{\text{ш}_{\text{вых}}}} \right)_{\text{max}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Поставив (8) в (7) и перейдя к логарифмической мере, получим

$$20 \lg H_{\text{н}}(\varphi, \theta) + \Psi_{\text{max}} < \Psi_{\text{пор}}. \quad (9)$$

Из выражений (9) и (6), изменив знак неравенства, получим выражение для рабочей зоны:

$$20 \lg \frac{H(\varphi, \theta)}{H(\varphi_0, \theta_0)} + \Psi_{\text{вых}} \geq \Psi_{\text{пор}}. \quad (10)$$

Левую часть выражения (10) можно сопоставить части поверхности верхней полусферы. От-

сюда выполнением сканирования по пространству подсчитывается площадь области верхней полусферы, которая удовлетворяет условию (10). Далее определяется величина рабочей или нерабочей зоны по общему принципу (1).

Оценка величины рабочих зон глобальных навигационных спутниковых систем при подавлении помех. Далее приведены построенные с помощью формул (1)–(10) рабочие области ГНСС (зоны видимости НКА) в проекции на плоскость АР при фиксированном ЗО НАП. Рабочие зоны определялись по завершении адаптации алгоритма подавления помех. Адаптация выполнена на программной модели при полосе пропускания канала радиочастотного преобразователя ЦАР 16 МГц и ширине спектра широкополосной помехи 16 МГц. Расчеты выполнены на примере ГНСС ГЛОНАСС при расстоянии между фазовыми центрами вибраторов АР $\lambda = d/2$.

На рис. 2–6 представлены проекции части поверхности $\Psi_{\text{вых}}$ на плоскость расположения ЦАР, которая удовлетворяет неравенству (10) (рабочая зона) при мощности системного сигнала ГНСС $P_{\text{с}} = -120$ дБм, суммарной мощности помех в полосе обработки $P_{\Sigma I} = -60$ дБм и мощности собственного шума приемного канала НАП $P_{\text{н}} = -100$ дБм для четырех- и семиэлементных ЦАР при различной помеховой обстановке. ЗО для рис. 2, а–б, а составляет –30 дБ, для рис. 2, б–б, б он равен –40 дБ. Зоны видимости показаны белой заливкой, зоны невидимости – серой.

Рабочие зоны ГЛОНАСС для четырехэлементной адаптивной фазированной антенной решетки. Проекция на рис. 2 получены при одной широкополосной помехе, расположенной в плоскости горизонта. Рабочие зоны при действии двух широкополосных помех представлены на рис. 3, при действии трех широкополосных помех – на рис. 4; две помехи разнесены по азимуту на 180°, три помехи – на 120°.

Рис. 4 получен при воздействии на четырехэлементную ЦАР трех помех. Такое количество

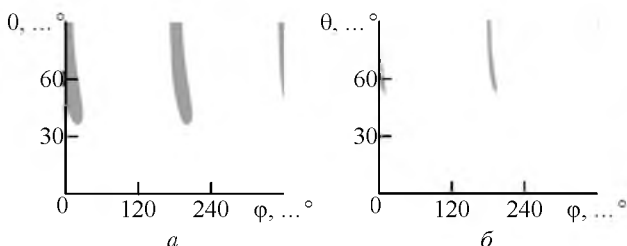


Рис. 2

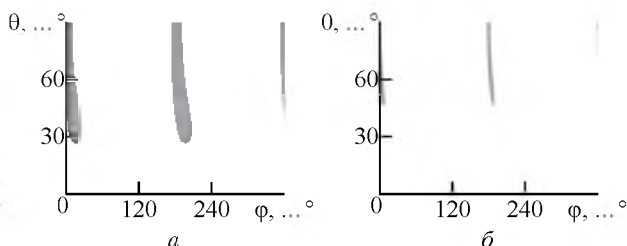


Рис. 3

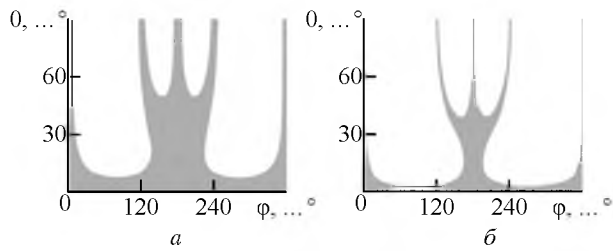


Рис. 4

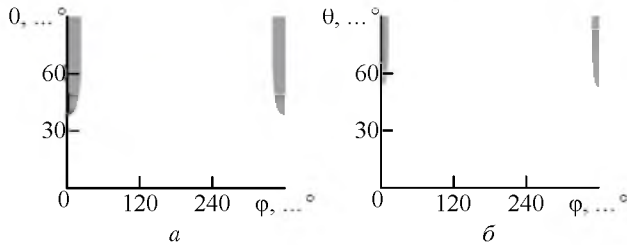


Рис. 5

помех является предельно, определенным числом степеней свободы этой ЦАР. Несмотря на то, что помехи размещены практически в плоскости горизонта, нерабочая область формируется не только в направлениях локализации помех, но и в области зенита. Следовательно, подавление такого количества помех с помощью четырехэлементной ЦАР недостаточно эффективно.

Рабочие зоны ГЛОНАСС для семизэлементной адаптивной фазированной антенной решетки. На рис. 5 и 6 приведены рабочие области при действии одной (рис. 5) и шести (рис. 6) широкополосных помех. В последнем случае дополнительный угол места помех составляет $\theta = 85^\circ$, по азимуту источники помех распределены равномерно.

Таким образом, для защищаемой НАП, характеризуемой параметром ЗО, площадь и конфи-

гурация рабочей зоны существенно зависят от помеховой обстановки. Например при использовании семизэлементной АФАР и ЗО -30 дБ, рабочая область составляет 92 % при одной помехе и 67 % при шести помехах. При ЗО -40 дБ эта величина равняется 96 % для случая одной помехи и 86 % для шести помех.

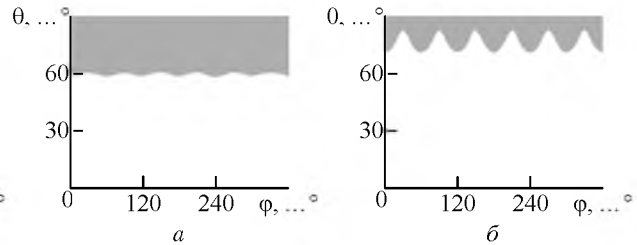


Рис. 6

Величины рабочей зоны и ЗО (принимающего отрицательные значения) связаны обратной монотонной зависимостью.

Эффективность подавления помех в ГНСС, характеризуемая площадью рабочей области, снижается при уменьшении количества резонаторов ЦАР с семи до четырех. Так, при действии одной широкополосной помехи, мощности сигнала НКА $P_c = -130$ дБм и ЗО -40 дБ площадь рабочей области для семи антенн составляет 94 %, а для четырех антенн – 92 %.

Исследования показали также, что площадь рабочей зоны при оптимизации расстояния между вибраторами ЦАР (наилучшее значение $d = 2\lambda/3.56$) возрастает на 5...6 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харрисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Немов А. В. Защита от радиопомех авиационной аппаратуры ГНСС гражданского назначения // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2010. № 6. С. 3–9.

A. V. Nemov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Working zones of global navigation satellite systems using interference suppressors

The computational procedure of calculation of working zones of global navigation satellite systems is presented. The method is established on power budget of system signal computation at interferences action. Some examples of working zones for GLONASS at two configurations of antenna array and various jammers environments are given.

Noise stability, interference suppressor, GNSS working zone

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2014 г.