

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

УДК 621.396.26

Поступила в редакцию 14.09.2017
Received 14.09.2017

С. М. Костромицкий, Э. И. Шамович

Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОСТАНОВКИ ПОМЕХ ПРИЕМНИКАМ СИСТЕМ
ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ, УСТОЙЧИВЫХ К ПОДАВЛЕНИЮ СРЕДСТВАМИ
КОГЕРЕНТНОЙ АВТОКОМПЕНСАЦИИ**

Аннотация. Активные помехи приемникам систем глобальной навигации – СГН (GPS, Галилео, ГЛОНАСС, Бейдоу) приобретают все большее значение в задачах обеспечения безопасности, управления и контроля. С использованием СГН несложно организуются разнообразные задачи: транспортные, организации охраны мобильных объектов или лиц, контроля трафика и др. Организация постановки эффективных помех, блокирующих нормальную навигацию, является важной научной и прикладной задачей. Постановка помех СГН, хотя и подпадает под формальные международные ограничения, тем не менее является обязательной военно-технической составляющей обеспечения обороноспособности любого развитого государства.

Опыты последних лет свидетельствуют о быстром развитии техники постановки активных помех СГН и борьбы с ними. Эффективное применение активных помех пользователям СГН заставило производителей вооружений всерьез заняться усилением помехоустойчивости СГН современными методами. Несмотря на определенные ограничительные условия по этому свойству систем (большие дальности до спутников, ограничения на мощность излучаемых ими информационных сигналов, слабая направленность их передающих антенн) в странах-владельцах СГН опубликовано много информации о достижении резкого усиления их помехоустойчивости, что вызывает определенные сомнения в объективности данных.

В статье представлены результаты научного анализа и моделирования эффективности постановки помех потребителям информации СГН с приемниками, оснащенными корреляционными автокомпенсаторами активных помех (АК). Приведены доказательства снижения эффективности подавления помех, основанные на использовании принципиально параметрических свойств АК.

Ключевые слова: системы глобальной навигации, помехи, компенсаторы активных помех, эффективность когерентного подавления помех

Для цитирования. Костромицкий, С. М. Исследование способов постановки помех приемникам систем глобальной навигации, устойчивых к подавлению средствами когерентной автокомпенсации / С. М. Костромицкий, Э. И. Шамович // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – №4. – С. 68–79.

S. M. Kostromitsky, E. I. Shamovich

Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**RESEARCHING THE GNSS RECEIVER JAMMERS THAT ARE RESISTANT TO SUPPRESSION THROUGH
EMPLOYMENT OF COHERENT AUTOMATIC JAMMING CANCELERS**

Abstract. Active jamming of a global navigation system GNSS receiver (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) is of growing significance for the missions of security, control and monitoring. GNSS facilitates organization of various tasks: transportation, protecting mobile facilities or persons, traffic control, and a lot of others. Organizing generation of effective jamming denying normal navigation represents an important applied problem. Jamming GNSS, even though formally subject to international restrictions, is nevertheless a mandatory military technical component of ensuring the defensive capability of any developed state.

The experience of recent years testifies to fast development of the equipment generating jamming against GNSS, and the technologies of counteracting jamming. Effective employment of jamming against GNSS users made the arms manufacturers seriously tackle the problem of improving jamming immunity of GNSS through modern techniques. Given the certain narrow limits for this characteristic of a system (long distances to satellites, limitations imposed on the power of information signals emitted by them, feeble directivity of their transmitting antennas), the countries possessing GNSS have published a plethora of information related to having achieved a dramatic improvement of their antijamming capacity giving rise to certain doubt in objectivity of the data.

The article presents the results of scientific analysis and modeling of effectiveness of jamming against users of GNSS information with the receivers outfitted with correlative automatic jamming cancellers (AJC). Proof is provided of corrupting effectiveness of jamming cancellation, based on use of essentially parametric properties of the AJCs.

Keywords: global navigation systems, jamming, jamming cancellers, effectiveness of coherent jamming cancellation

For citation. Kostromitsky S. M., Shamovich E. I. Researching the GNSS receiver jammers that are resistant to suppression through employment of coherent automatic jamming cancelers. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 68–79 (in Russian).

Введение. Системы глобальной навигации (СГН) играют весьма важную роль во множестве современных прикладных задач: например, управление движением разнообразных объектов – автомобилей, судов, летательных аппаратов, людей и т. д. Стремительно расширяется сфера применения указанных систем. Вопреки анонсированным и закрепленным международными договорами целям и задачам стремительно расширяется их применение в военном деле. Предельно просто и дешево с помощью СГН решаются задачи навигации самолетов, ракет, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), танков, боевых подразделений, солдат и т. д.

СГН стали мощным подспорьем в организации и ведении боевых действий. Именно поэтому в последние годы активно развиваются средства дистанционного блокирования аппаратуры пользователей СГН с использованием активных помех.

Известно, что одним из простейших способов блокирования указанных систем, который нашел широкое практическое применение, является их подавление активными помехами. Поэтому после 2003 г. профильные специалисты предприняли значительные усилия по преодолению проблемы влияния активных помех на эффективность пользовательской аппаратуры. Среди разработанных мер можно отметить изменение закона модуляции изучаемых сигналов спутников, введение дополнительных частотных каналов для их передачи, применение когерентных автокомпенсаторов (АК) на пользовательских приемниках и т. д. [4–7].

При этом очевидными оставались: принципиальная подверженность работы приемников сигналов СГН активным помехам даже небольшой интенсивности; ограниченность свободы действий разработчиков по повышению помехозащищенности тем, что созвездия, по крайней мере GPS и ГЛОНАСС, к тому времени практически сформировались, поэтому отсутствовала возможность изменения состава и параметров бортовой аппаратуры спутников, в списке возможностей были лишь применение резервной аппаратуры и корректировка программного обеспечения с использованием дистанционного управления.

Наиболее эффективной допустимой мерой по защите пользовательской аппаратуры оказались АК. Разработчики этой аппаратуры после нескольких эффективных применений помех немедленно отреагировали выпуском комплексных антенн GPS, состоящих из антенны основного приемного канала и от 4 до 7 дополнительных антенн для АК.

Появились публикации, доказывающие, что АК – решение, обеспечивающее в широком диапазоне условий достаточную помехозащиту, которую трудно или практически невозможно преодолеть (например, [1]).

Анализ переходных процессов многоканального корреляционного АК. В настоящей статье рассматриваются некоторые способы снижения эффективности помехозащиты приемников сигналов СГН с АК до состояния, при котором помеха сохраняет свою эффективность и обеспечивает лишение потребителя СГН качественной информации.

На рис. 1 представлена схема корреляционного АК помех. Сигнал на выходе АК описывается

выражением $S_{\Sigma} = S_0(t) + \sum_{i=1}^N S_i(t)w_i$.

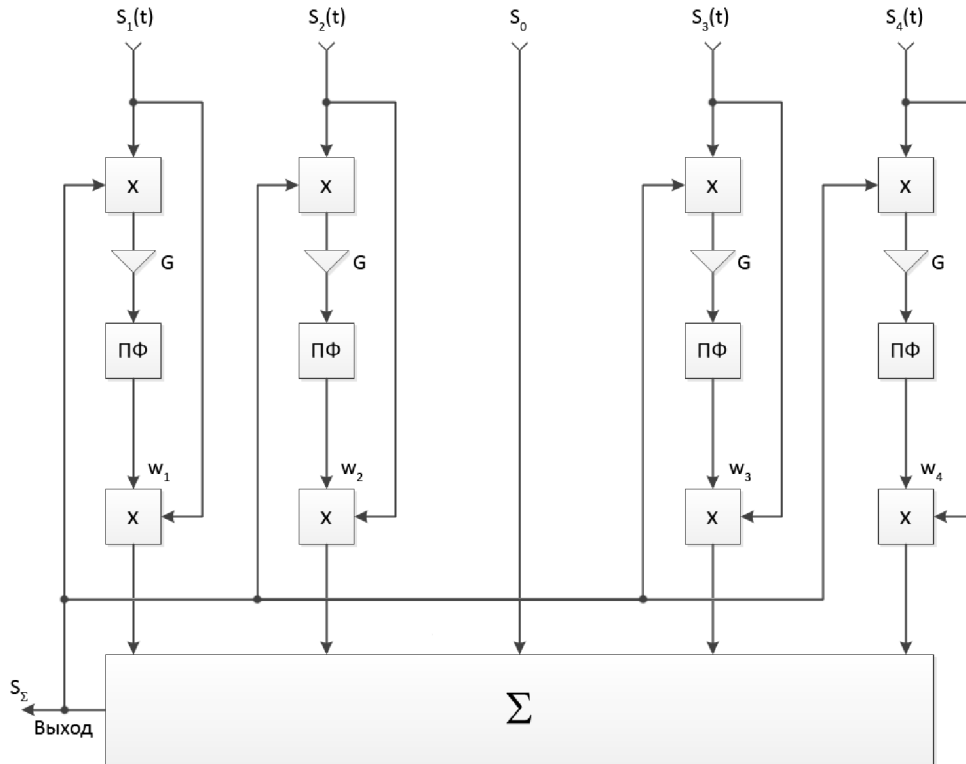


Рис. 1. Структурная схема корреляционного автокомпенсатора помех: ПФ – полосовой фильтр; G – усилитель с коэффициентом усиления G (учитывает в том числе все коэффициенты преобразования смесителей и ПФ); X – перемножитель

Fig. 1. Correlative automatic jamming canceller block diagram: ПФ – band-pass filter; G – amplifier with gain factor G (takes into account all conversion factors of mixers and band-pass filters); X – multiplier

Форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) полосового фильтра не имеет критического значения: при аналоговой реализации АК на радиочастоте она имеет вид АЧХ резонансного контура с квадратом АЧХ

$$|K_{\text{пф}}(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega - \omega_{\text{ф}})^2 T_{\text{ф}}^2}, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{ф}}$ и $T_{\text{ф}}$ – соответственно частота настройки и постоянная времени резонансного контура, при реализации на видеочастоте она имеет вид АЧХ апериодического звена (1) с $\omega_{\text{ф}} = 0$.

При цифровой реализации полосовых фильтров (ПФ) в таких задачах особенности обычно не возникают. В предположении идентичности коэффициентов усиления каналов G_k , можно записать дифференциальное уравнение, отражающее динамику комплексных весовых коэффициентов \dot{w}_k , в виде

$$T_{\text{ф}} \frac{d\dot{w}_k(t)}{dt} + \dot{w}_k(t) = -G\dot{S}_k^*(t) \cdot \left[\sum_{i=1}^N \dot{w}_i(t)\dot{S}_i(t) + \dot{S}_0(t) \right], \quad k = \overline{1, N}$$

или в матричной форме

$$T_{\text{ф}} \frac{d\dot{\mathbf{W}}(t)}{dt} + \dot{\mathbf{W}}(t) = -G\dot{\mathbf{S}}^*(t)\dot{\mathbf{W}}^T(t)\dot{\mathbf{S}}(t) - G\dot{\mathbf{S}}^*(t)\dot{S}_0(t), \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{W}}(t) = \{\dot{w}_1(t), \dot{w}_2(t), \dots, \dot{w}_N(t)\}^T$ – вектор-столбец весовых коэффициентов; $\dot{\mathbf{S}}(t) = \{\dot{S}_1(t), \dot{S}_2(t), \dots, \dot{S}_N(t)\}^T$ – вектор-столбец сигналов дополнительных приемных каналов; $\dot{S}_0(t)$ – сигнал основного канала АК.

Первое слагаемое в правой части (2) перепишем в виде $-G\dot{\mathbf{S}}^*(t)\dot{\mathbf{W}}^T(t)\dot{\mathbf{S}}(t) = -G\dot{\mathbf{S}}^*(t)\dot{\mathbf{S}}^T(t)\dot{\mathbf{W}}(t)$ и примем во внимание, что математическое ожидание произведений $\dot{\mathbf{S}}^*(t)\dot{\mathbf{S}}^T(t)$ и $\dot{\mathbf{S}}^*(t)\dot{S}_0(t)$ – это корреляционная матрица помехи.

реляционная матрица сигналов дополнительных каналов АК и вектор взаимных корреляционных сигналов основного и дополнительных каналов $\dot{\mathbf{R}}_0 = \{\dot{S}_1^*(t)\dot{S}_0(t), \dot{S}_2^*(t)\dot{S}_0(t), \dots, \dot{S}_N^*(t)\dot{S}_0(t)\}$. Здесь на основании предположения о стационарности входных сигналов $\dot{S}_i(t)$ статистическое усреднение заменено временным.

Тогда (2) принимает вид

$$T_\Phi \frac{d\dot{\mathbf{W}}}{dt} + \dot{\mathbf{W}} = -G\dot{\mathbf{R}}_0 - G\dot{\mathbf{R}}\dot{\mathbf{W}}$$

или

$$T_\Phi \frac{d\dot{\mathbf{W}}}{dt} + \dot{\mathbf{W}}(\mathbf{E} + G\dot{\mathbf{R}}) = -G\dot{\mathbf{R}}_0, \tag{3}$$

где \mathbf{E} – единичная матрица. Из уравнения (3) следует, что при $t \rightarrow \infty$ и завершении переходных процессов установившееся значение $\dot{\mathbf{W}}_{уст} = -(\mathbf{E} + G\dot{\mathbf{R}})^{-1}G\dot{\mathbf{R}}_0 = -\left(\frac{\mathbf{E}}{G} + \dot{\mathbf{R}}\right)^{-1} \dot{\mathbf{R}}_0$.

При этом очевидно, что наличие единичной матрицы в последней форме отражает лишь статический характер ПФ. При использовании астатических ПФ $\dot{\mathbf{W}}_{уст} = -\dot{\mathbf{R}}^{-1}\dot{\mathbf{R}}_0$.

Для практических задач первоочередное значение имеет сходимость процесса самонастройки АК, его быстродействие и эффективность подавления помех. Оценка этих свойств возможна на основании решения системы дифференциальных уравнений (3).

Решение (3) осложняется взаимосвязью ее уравнений через недиагональную корреляционную матрицу $\dot{\mathbf{R}}$. Формирование общих представлений о поведении интересующих нас параметров возможно в результате диагонализации $\dot{\mathbf{R}}$.

Перевод матрицы $\dot{\mathbf{R}}$ к диагональному виду осуществляется с переходом в ее собственное подпространство, орты которого формируются из ее собственных векторов [2].

Дифференциальное уравнение относительно весового вектора $\dot{\mathbf{W}}$ в собственном пространстве матрицы $\dot{\mathbf{R}}$ приобретает вид

$$T_\Phi \frac{d\dot{\mathbf{W}}'}{dt} + \dot{\mathbf{W}}'[\mathbf{E} + G\dot{\mathbf{R}}'] = -G\dot{\mathbf{R}}'_0. \tag{4}$$

Здесь $\dot{\mathbf{R}}'$ и $\dot{\mathbf{R}}'_0$ получены в результате статистической обработки не вектора $\dot{\mathbf{S}}$, а преобразованного вектора $\dot{\mathbf{S}}' = \dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{S}}$ ($\dot{\mathbf{Q}}$ – матрица собственных векторов матрицы $\dot{\mathbf{R}}$). Поэтому в (4) $\dot{\mathbf{R}}'$ является диагональной, а уравнения системы – независимыми.

Не вдаваясь в несущественные в этом изложении детали, запишем готовое решение (4) в скалярном виде [3]

$$\dot{w}'_k(t) = [\dot{w}'_k(0) - \dot{w}'_k(\infty)]e^{-\alpha_k t} + \dot{w}'_k(\infty), \tag{5}$$

где $\dot{w}'_k(\infty) = \frac{G\lambda_k}{1 + G\lambda_k} \dot{w}'_{k \text{ опт}}$ – установившееся значение k -го весового коэффициента АК в собственном подпространстве матрицы $\dot{\mathbf{R}}$; $\dot{w}'_{k \text{ опт}} = -\frac{\dot{R}'_{0k}}{\lambda_k}$; $\alpha_k = \frac{1 + G\lambda_k}{T_\Phi}$.

Из (5) видно, что завершение переходного процесса АК в целом происходит только после завершения переходного процесса в канале с минимальным собственным значением λ .

Очевидно, что каждый из N реальных переходных процессов (3) будет определяться весовой суммой из компонент (5), $k = \overline{1, N}$. Поэтому каждый из весовых коэффициентов \dot{w}'_k установится не ранее, чем самый «медленный» из \dot{w}'_k .

Известно, что след матрицы $\dot{\mathbf{R}}$: $Sp \dot{\mathbf{R}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \sum_{i=1}^N (2\sigma_{\Pi i}^2 + 2\sigma_{\text{ш}i}^2)$ – определяется суммарной средней мощностью сигналов и внутренних шумов приемников дополнительных каналов АК. Здесь $2\sigma_{\Pi i}^2$ и $2\sigma_{\text{ш}i}^2$ соответственно средние мощности помехи, принимаемой i -м дополнительным каналом, и его внутреннего шума.

Используемый в теории матриц термин «обусловленность матрицы» (*conditioning*) может быть определен в рассматриваемых приложениях как отношение ее максимального значения к минимальному собственному: $Cond \mathbf{R} = \lambda_{\max} / \lambda_{\min}$.

В наших приложениях если число одновременно действующих источников излучения $M < N$, то минимальное собственное значение $\lambda_{\min} = 2\sigma_{\text{ш}}^2$ – средняя мощность внутреннего шума дополнительных каналов приема в предположении их равенства [3]. Значит, в пренебрежении мощностью внутренних шумов дополнительных каналов величина $\sum_{i=1}^N \lambda_i$ равна суммарной средней мощности сигналов дополнительных каналов АК, подлежащих подавлению.

Следует отметить, что каждое из собственных значений может варьировать в зависимости от: соотношения мощностей собственно подавляемых источников излучения; их относительно-го углового положения; взаимной корреляции их комплексных амплитуд и др.

Перечисленные факторы, изменяясь, могут влиять на обусловленность $Cond \mathbf{R}$, улучшая или ухудшая ее, уменьшая или увеличивая λ_{\min} , а значит, уменьшая или увеличивая α_k из (5).

Заманчивой представляется идея аналитического исследования распределения собственных значений λ_k в зависимости от перечисленных факторов, но это исследование при $N > 2$, как показывает практика, является громоздким, а при $N > 4$ в большинстве случаев нереализуемым. Кроме того, быстродействие АК фактически зависит не только от значений $Cond \mathbf{R}$, но и от начальных условий $\dot{w}_k(0)$. В (5) описан монотонно затухающий переходный процесс – фактически сильно упрощенная абстракция.

В реальности соотношение (3) описывает градиентный алгоритм поиска экстремума функционала качества (минимума дисперсии ошибки самонастройки, максимума отношения правдоподобия, максимума отношения сигнал/помеха и др. [3]), выбор которого не влияет на выводы настоящей статьи. При комплексном описании входных сигналов функционалы качества описываются сложными функциями, в общем случае $2N+1$ -мерного пространства, время достижения экстремума (то есть установившегося состояния) в которых сильно зависит не только от $Cond \mathbf{R}$, но и от начальных условий $\dot{w}_k(0)$.

Из изложенного следует вывод о том, что полезные результаты могут быть получены только с использованием имитационного моделирования поведения адаптивных процессов АК, представленного на рис. 1.

Объект исследования. С целью максимального приближения к практике (подавление помех GPS приемником с четырехканальным АК активных помех) исследованию подвергается АК со структурной схемой, представленной на рис. 1. Фото антенной системы и формы диаграмм направленности антенн основного и дополнительных каналов представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

С целью исключения излишней детализации описания алгоритмов имитационного моделирования отметим, что моделирование осуществлялось в ходе решения системы (3), все сигналы,

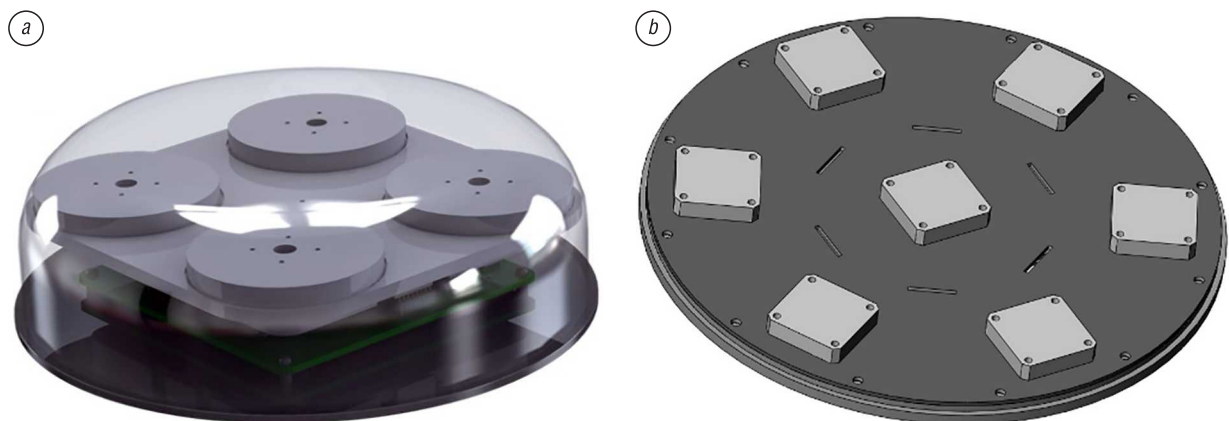


Рис. 2. Антенные системы GPS приемников с автокомпенсатором помех
Fig. 2. GPS receiver antenna systems with automatic jamming canceller

весовые коэффициенты и их описания – комплексные случайные процессы. Начальные условия задавались разнообразными для оценки их влияния на сходимость и время адаптации системы. В результате имитационного моделирования большого объема получены практически полезные результаты, описываемые далее в статье.

Результаты имитационного моделирования. Автокомпенсатор с двумя дополнительными каналами. Один источник помехи. Для простоты вначале проведем моделирование работы АК с двумя дополнительными каналами при наличии единственного источника помех. В условиях отсутствия мерцания АК успешно подавляет помеху, наряду с этим отношение помеха/внутренний шум приемных каналов составляет 30 дБ.

При этом исходные процессы комплексной самонастройки весовых коэффициентов \dot{w}_1 и \dot{w}_2 заканчиваются примерно одновременно по фазе и амплитуде за 10–20 мкс (рис. 4), усредненная по времени диаграмма направленности приемной антенны GPS с учетом АК изображена на рис. 5.

Эффективность подавления помехи составляет порядка $\nu_{\Pi} = 30$ дБ, что вполне соответствует ожиданиям и множеству известных практических выводов. При этом под эффективностью подавления помехи ν_{Π} мы понимаем отношение мощности помехи на выходе АК при его выключенном и включенном состояниях. Очевидно, что в условиях постановки единственной помехи допустимым способом снижения эффективности ν_{Π} является амплитудная модуляция помехи. При этом частота модуляции критична для максимизации ее эффективности и должна выбираться исходя из полосы пропускания замкнутого АК.

В наших экспериментах мы выбрали частоту амплитудной модуляции примерно 100 кГц и добились снижения ν_{Π} всего на 4–5 дБ. Казалось бы, резонансные замирания сигнала помехи должны обеспечивать большие потери в значениях ν_{Π} , но причина незначительности выигрыша становится понятной из следующих соображений. При поступлении мощной помехи полоса замкнутого АК быстро расширяется и быстродействие составляет десятки микросекунд. При ослаблении (выключении) помехи значение α_k в (5) падает примерно в тысячу раз и система становится вялой. Для «забывания» положения источника помехи требуется время, гораздо большее, чем на начальную настройку.

Добиться «забывания» мы можем с помощью более длительного отключения помехи. Но этот путь имеет ограниченные возможности: при слишком длительном отключении помехи она перестает выполнять свои функции – мешать местоопределению. Именно поэтому практический выигрыш в потере эффективности подавления столь невелик. Из изложенного вытекает целесообразность перехода к синхронной модуляции параметров помех, излучаемых из рассовмещенных в пространстве точек.

Таким образом, рассмотрена ситуация, в которой реализуется временная модуляция единственного «сигнального» собственного значения λ_k из выражения (5).

Автокомпенсатор с четырьмя дополнительными каналами. При задании трех непрерывных шумовых помех, действующих с различных угловых направлений при равных средних мощностях и отношении помеха/внутренний шум, используется антенна, изображенная на рис. 2, а.

При исследовании четырехканального АК было выполнено множество экспериментов, в ходе которых оценивались реализуемые коэффициенты подавления (К) при действии помех.

В первом варианте задавалась помеха с одного углового направления (с использованием временной модуляции). Эксперименты показали, что увеличение числа компенсационных каналов

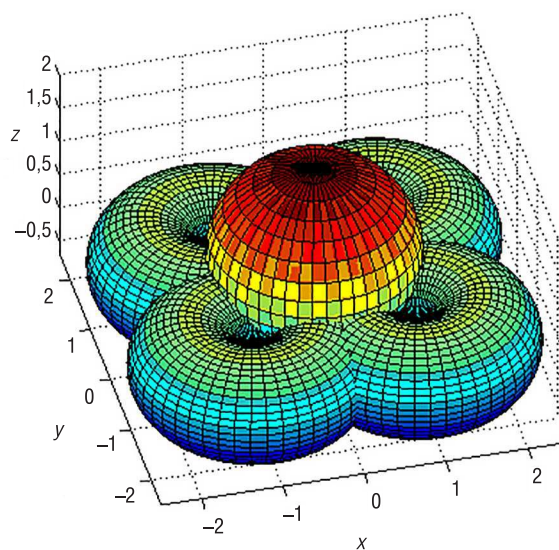


Рис. 3. Формы диаграмм направленности антенн основного и дополнительных каналов

Fig. 3. Shapes of antenna patterns of the main and additional channels

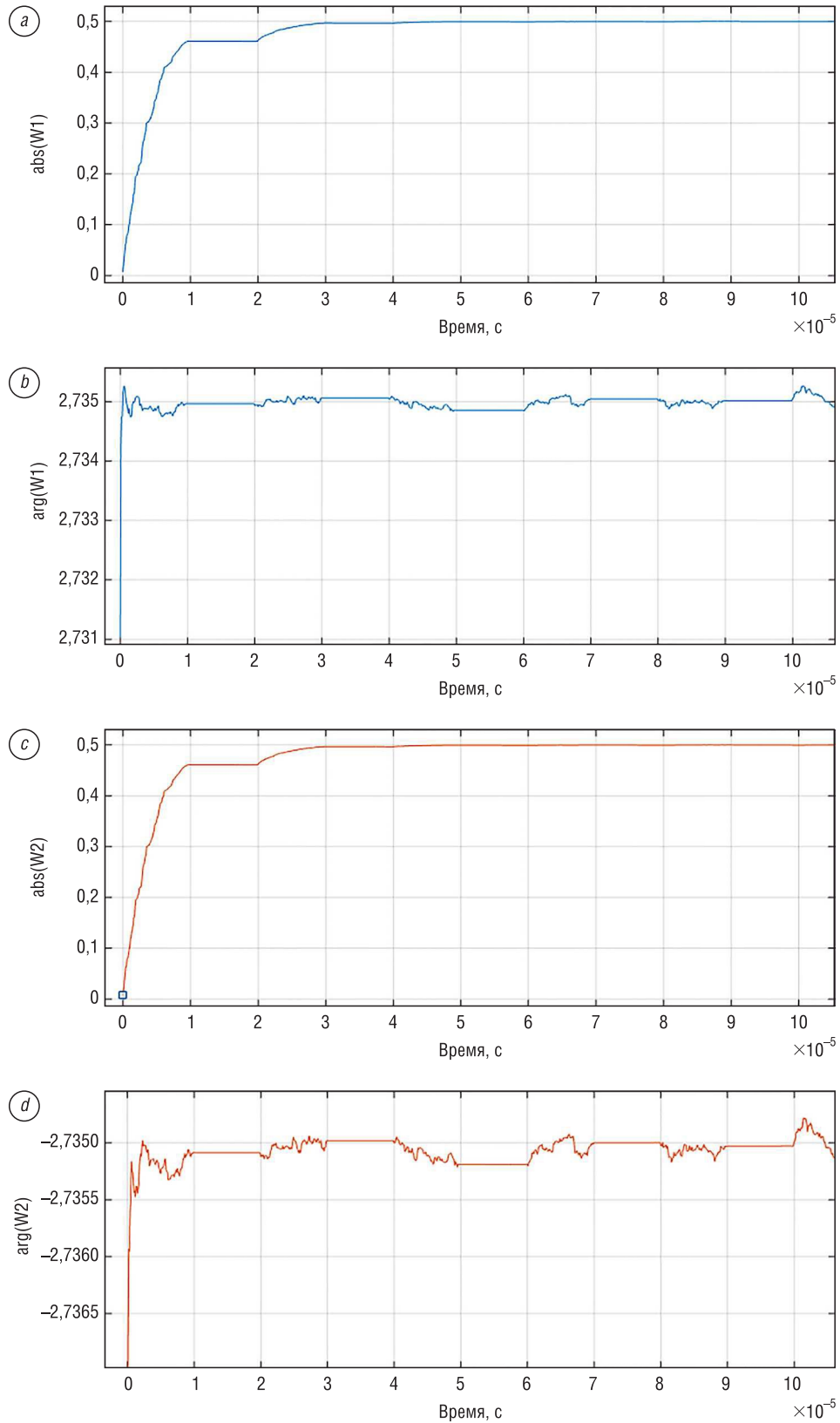


Рис. 4. Переходный процесс самонастройки весовых коэффициентов \dot{w}_1 и \dot{w}_2 : a – модуль \dot{w}_1 , b – аргумент \dot{w}_1 , c – модуль \dot{w}_2 , d – аргумент \dot{w}_2

Fig. 4. Transitional process of self-tuning of weighting coefficients \dot{w}_1 and \dot{w}_2 : a – modulus \dot{w}_1 , b – argument \dot{w}_1 , c – modulus \dot{w}_2 , d – argument \dot{w}_2

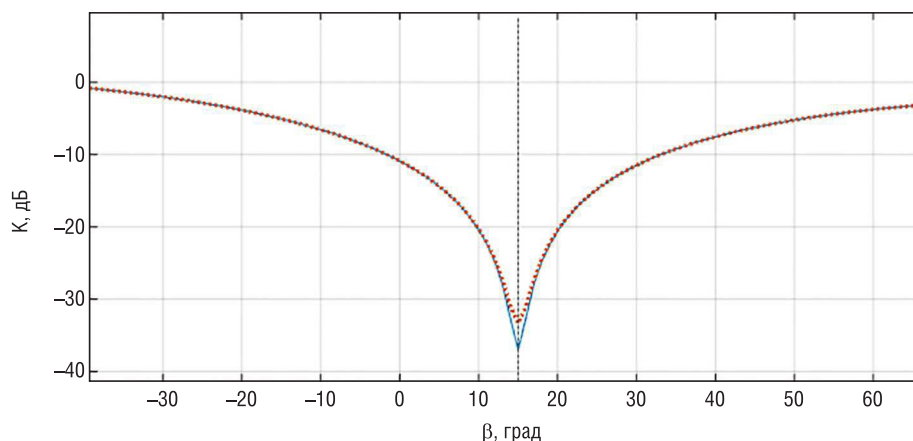


Рис. 5. Усредненная по времени диаграмма направленности приемной антенны GPS с учетом АК
 Fig. 5. Time-averaged receiving GPS antenna pattern taking into account JC

снижает эффективность применения мерцающей помехи: выигрыш в снижении коэффициента подавления помехи за счет оптимально подобранной частоты мерцаний снижается с 4–5 до 1–2 дБ.

Во втором варианте задавалось мерцание помех с частотой мерцания в 100 кГц, попеременно действующих с трех угловых направлений, что позволило снизить коэффициент подавления на 5–6 дБ по сравнению с подавлением немерцающей помехи, действующей с одного углового направления.

Рассмотрим показательный пример, доказывающий высокие потенциальные возможности, которыми обладает метод управления обусловленностью корреляционной матрицы $\dot{\mathbf{R}}$ совместно с применением мерцающих помех.

Для демонстрации роли $Cond \dot{\mathbf{R}}$ моделируются две ситуации.

В первой ситуации две попеременно включаемых с частотой 100 кГц группы источников помех равной мощности с разных азимутов и одинаковым углом места для всех в $\varepsilon = 0^\circ$:

- первая группа: $\beta_1 = -90^\circ, \beta_2 = 0^\circ, \beta_3 = 90^\circ$;
- вторая группа: $\beta_1 = -45^\circ, \beta_2 = 45^\circ, \beta_3 = 135^\circ$.

Отношение помеха/шум по всем источникам одинаково и составляет 36 дБ. На рис. 6 показаны переходные процессы самонастройки АК для примера первого весового коэффициента \dot{w}_1 по амплитуде и фазе (остальные, $\dot{w}_2-\dot{w}_4$ ведут себя сходным образом).

Из рис. 6 видно, что переходные процессы заканчиваются примерно за 100 мкс, причем процессы настройки фазы завершаются гораздо быстрее за счет малых начальных амплитуд \dot{w}_1 .

На рис. 7 показаны реализуемые усредненные за 50 мс азимутальные диаграммы направленности для указанных двух групп источников – при отсутствии мерцания (действует только одна группа – сплошная линия) и при попеременном включении-выключении с частотой 100 кГц (пунктирная линия).

Из рис. 7 видно, что применение описанного способа мерцания приводит к существенному снижению коэффициента подавления АК на 15–20 дБ по сравнению с потенциалом.

Во второй ситуации две попеременно включаемых с частотой 100 кГц группы из трех источников помех в условиях первой ситуации, но с азимутами:

- первая группа: $\beta_1 = -30^\circ, \beta_2 = 0^\circ, \beta_3 = 30^\circ$;
- вторая группа: $\beta_1 = -15^\circ, \beta_2 = 15^\circ, \beta_3 = 45^\circ$.

В условиях этого примера обусловленность матрицы $Cond \dot{\mathbf{R}}$ заметно ухудшена, что привело к значительному увеличению длительности процесса самонастройки, которая составила около 15 мс (рис. 8). Поэтому для второй ситуации частота мерцаний была снижена до 1 кГц (рис. 9). При этом выигрыш в снижении коэффициентов подавления помехи не столь велики (рис. 10), как в предыдущем примере, впрочем, с ухудшением $Cond \dot{\mathbf{R}}$ снизились и сами потенциальные коэффициенты.

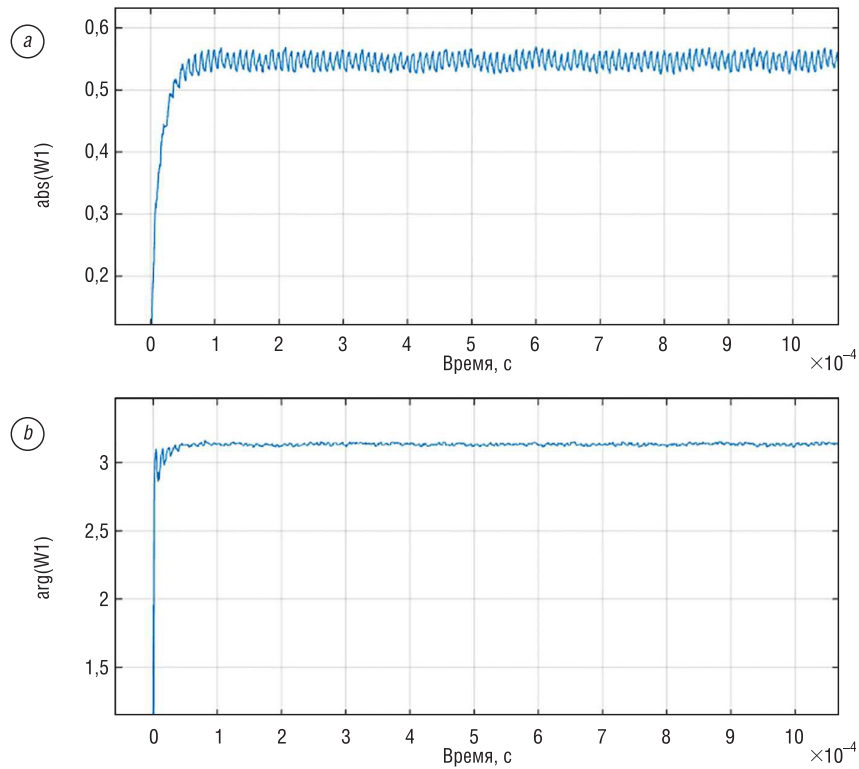


Рис. 6. Переходный процесс самонастройки весового коэффициента \dot{w}_1 : a – модуль \dot{w}_1 , b – аргумент \dot{w}_1
 Fig. 6. Transitional process of self-tuning of weighting coefficient \dot{w}_1 : a – modulus \dot{w}_1 , b – argument \dot{w}_1

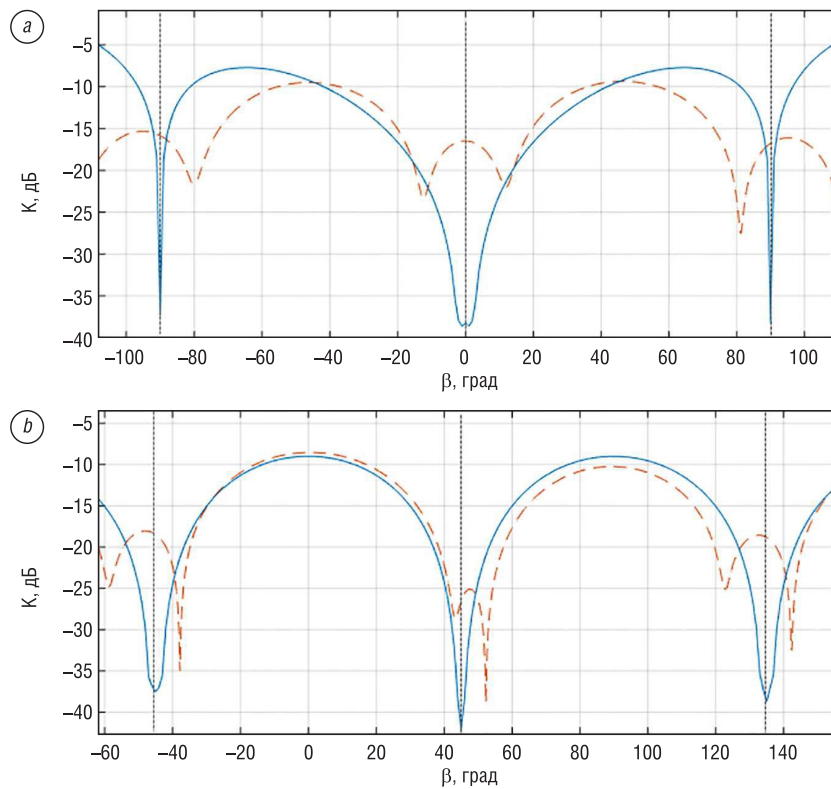


Рис. 7. Усредненная по времени диаграмма направленности приемной антенны GPS с учетом АК: $a - \beta_1 = -90^\circ, \beta_2 = 0^\circ, \beta_3 = 90^\circ$; $b - \beta_1 = -45^\circ, \beta_2 = 45^\circ, \beta_3 = 135^\circ$
 Fig. 7. Time-averaged receiving GPS antenna pattern taking into account JC: $a - \beta_1 = -90^\circ, \beta_2 = 0^\circ, \beta_3 = 90^\circ$; $b - \beta_1 = -45^\circ, \beta_2 = 45^\circ, \beta_3 = 135^\circ$

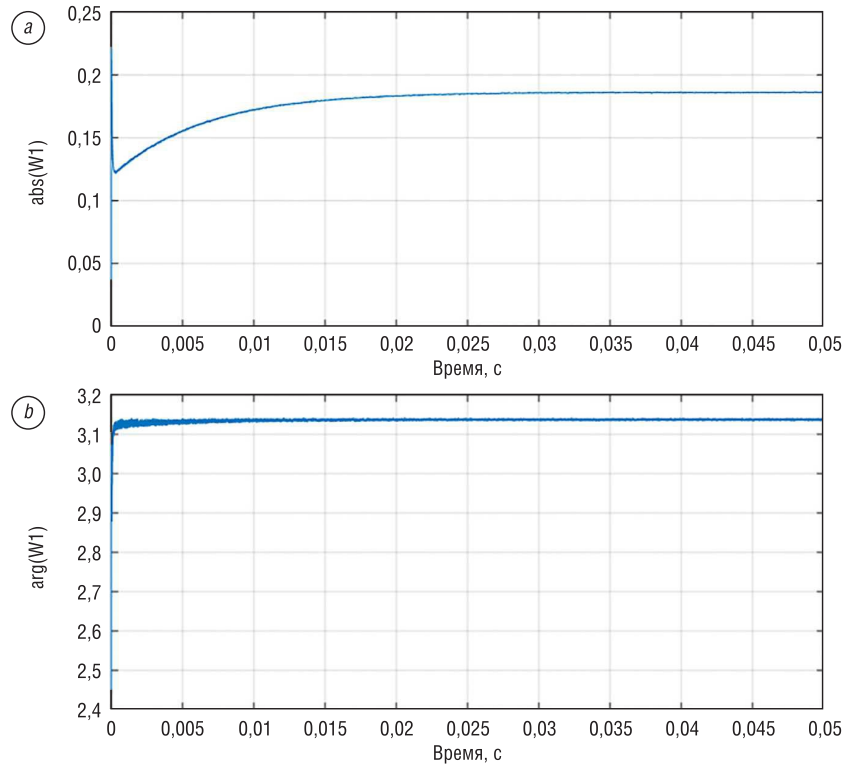


Рис. 8. Переходный процесс самонастройки весового коэффициента \dot{w}_1 (частота мерцаний 100 кГц): a – модуль \dot{w}_1 , b – аргумент \dot{w}_1

Fig. 8. Transitional process of self-tuning of weighting coefficient \dot{w}_1 (blink rate 100 kHz): a – modulus \dot{w}_1 , b – argument \dot{w}_1

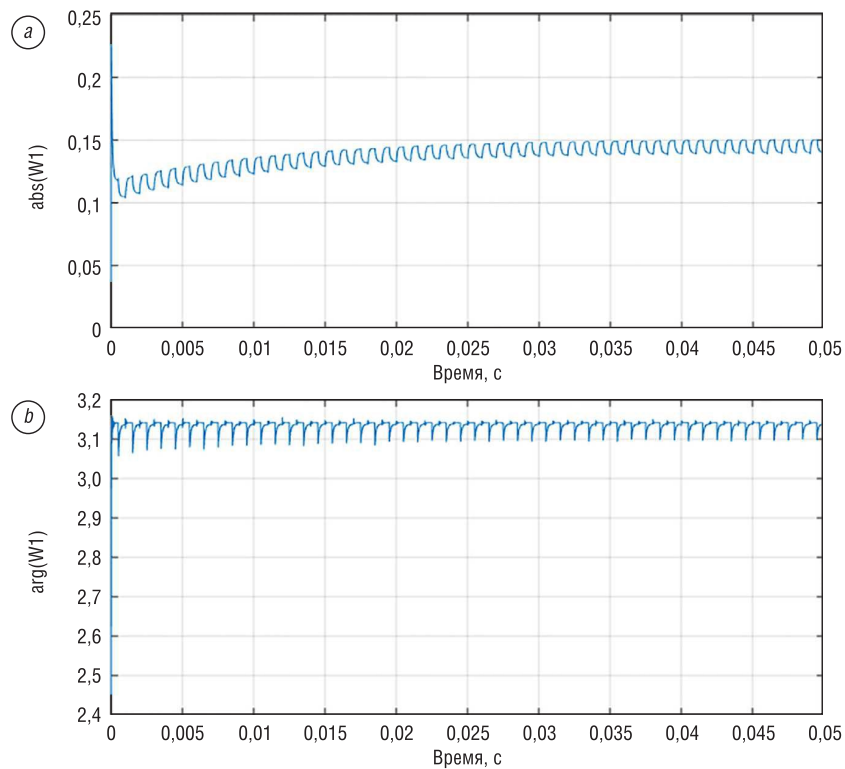


Рис. 9. Переходный процесс самонастройки весового коэффициента \dot{w}_1 (частота мерцаний 1 кГц): a – модуль \dot{w}_1 , b – аргумент \dot{w}_1

Fig. 9. Transitional process of self-tuning of weighting coefficient \dot{w}_1 (blink rate 1 kHz): a – modulus \dot{w}_1 , b – argument \dot{w}_1

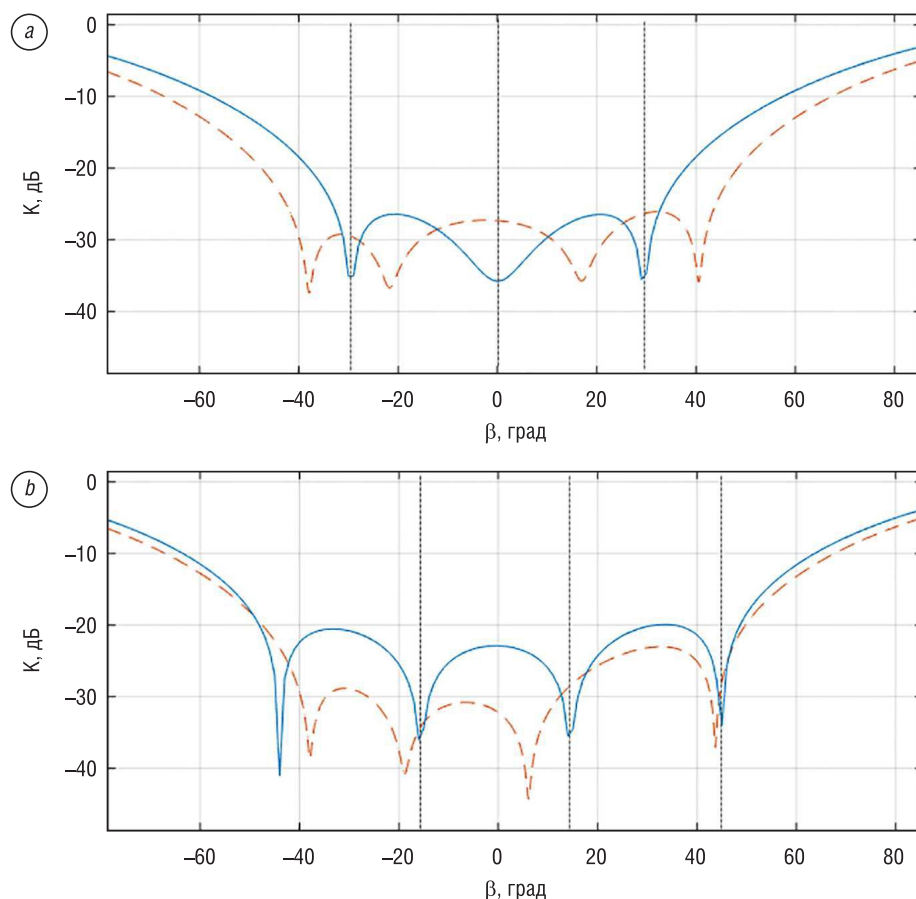


Рис. 10. Усредненная по времени диаграмма направленности приемной антенны GPS с учетом АК: $a - \beta_1 = -30^\circ$, $\beta_2 = 0^\circ$, $\beta_3 = 30^\circ$; $b - \beta_1 = -15^\circ$, $\beta_2 = 15^\circ$, $\beta_3 = 45^\circ$

Fig. 10. Time-averaged receiving GPS antenna pattern taking into account JC: $a - \beta_1 = -30^\circ$, $\beta_2 = 0^\circ$, $\beta_3 = 30^\circ$; $b - \beta_1 = -15^\circ$, $\beta_2 = 15^\circ$, $\beta_3 = 45^\circ$

Заключение. Применение АК в устройствах защиты от активных помех пользовательских приемников СГН является на сегодня наиболее эффективным способом. При этом появляющаяся в публикациях информация о коэффициентах подавления помех АК в 45–50 дБ и более на практике является преувеличением.

Стабилизация параметрических свойств АК с использованием различных автоматических регулировок усиления не может затрагивать или снижать влияние обусловленности корреляционных матриц сигналов дополнительных каналов.

Следует отметить, что упомянутая обусловленность сильно зависит от угловых расстояний между источниками помех, их пространственной и временной корреляций.

Проведенные исследования показали, что применение синхронной пространственно-временной модуляции сигналов от группы распределенных в пространстве наземных передатчиков помех обеспечивает снижение коэффициентов подавления помех до 15–20 дБ и более от их потенциальных значений, что вполне достаточно для прекращения местоопределения пользователей СНГ на тактических дальностях.

Список использованных источников

1. Быстряков, С.Г. Особенности испытаний антенных компенсаторов помех помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС/GPS / С.Г. Быстряков, В.Н. Харисов // Новости навигации. – 2010. – № 3. – С. 14–19
2. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1966. – 576 с.
3. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с., ил.

4. Anti-Jamming Techniques for GPS Receivers: AFRL-IF-RS-TR-2001-186. Final Technical Report. September 2001 [Electronic resource] / G. Amin Moeness [et al.]. – Mode of access: https://www.researchgate.net/profile/Moeness_Amin/publication/235141892_Anti-Jamming_Techniques_for_GPS_Receivers/links/0c960533314d91dfec000000/Anti-Jamming-Techniques-for-GPS-Receivers.pdf – Date of access: 01.09.2017.
5. McDonald, K. The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo / K. McDonald // *J. of Global Positioning System*. – 2002. – Vol. 1, N 1. – P. 1–17.
6. Petovello M. New GNSS frequencies advantages of M-Code, and the benefits of a solitary Galileo satellite [Electronic resource] / M. Petovello // *Inside GNSS*. – 2006. – Vol. 1, no. 4 (May/June). – Mode of access: <http://www.insidegnss.com/auto/MayJune06GNSSolutions.pdf> – Date of access 01.09.2017.
7. Moeness G. Amin. Signal Processing Techniques for Anti-Jamming Global Positioning System (GPS) Receivers. AFRL-IF-RS-TR-2005-290. Final Technical Report. August 2005 [Electronic resource] / Amin G. Moeness. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/235025855_Signal_Processing_Techniques_for_Anti-Jamming_Global_Positioning_System_GPS_Receivers – Date of access: 01.09.2017.

References

1. Bystryakov S. G., Harisov V. N. Specifics of testing antenna jamming cancellers of jam-protected GLONASS/GPS user navigation equipment. *Novosti navigatsii* [Navigation News], 2010, no 3, pp. 14–19 (in Russian).
2. Gantmacher F. R. *The theory of matrices*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 576 p. (in Russian).
3. Monzingo R. A., Miller T. W. *Introduction to Adaptive Arrays*. New York, John Wiley, 1980. 543 p. (in Russian).
4. Moeness G. Amin, Alan R. Lindsey et al. *Anti-Jamming Techniques for GPS Receivers*. AFRL-IF-RS-TR-2001-186. Final Technical Report. September 2001. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Moeness_Amin/publication/235141892_Anti-Jamming_Techniques_for_GPS_Receivers/links/0c960533314d91dfec000000/Anti-Jamming-Techniques-for-GPS-Receivers.pdf (Accessed 1 September 2017).
5. McDonald K. The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo. *Journal of Global Positioning System*, 2002, vol. 1, no. 1, pp. 1–17. Doi: 10.5081/jgps.1.1.1
6. Petovello M. New GNSS frequencies advantages of M-Code, and the benefits of a solitary Galileo satellite. *Inside GNSS*, May/June 2006, vol. 1, no. 4. Available at: <http://www.insidegnss.com/auto/MayJune06GNSSolutions.pdf> (Accessed 1 September 2017).
7. Moeness G. Amin. *Signal Processing Techniques for Anti-Jamming Global Positioning System (GPS) Receivers*. AFRL-IF-RS-TR-2005-290. Final Technical Report. August 2005. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235025855_Signal_Processing_Techniques_for_Anti-Jamming_Global_Positioning_System_GPS_Receivers (Accessed 1 September 2017).

Информация об авторах

Костромицкий Сергей Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровка, 15/5, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sleus@abv.bg

Шамович Эдуард Иосифович – начальник отдела, Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровка, 15/5, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shedi77@mail.ru

Information about the authors

Sergei M. Kostromitsky – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus (15/5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sleus@abv.bg

Eduard I. Shamovich – Head of the Department, Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus (15/5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shedi77@mail.ru