

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АДАПТИВНОЙ АНТЕННЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФАЗОВОГО СДВИГА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОПОРНОГО СИГНАЛА

Рассматривается адаптивная антенная система бортового применения, в которой осуществляется компенсация фазового сдвига при формировании опорного сигнала. Методом моделирования исследовано влияние постоянной времени фильтра и коэффициента усиления в основном контуре адаптации антенны, ширины спектра фазовых флуктуаций опорного сигнала, коэффициента усиления в канале компенсации фазового сдвига опорного сигнала на характеристики антенны и полезного сигнала, действующего на ее выходе

адаптивная антенная система, опорный сигнал, фазовый сдвиг, адаптивная обработка сигнала, коэффициент усиления, спектр фазовых флуктуаций

Постановка проблемы

Известно, что в адаптивных антенных системах (ААС) при формировании опорного сигнала неизбежно возникает фазовый сдвиг по различным причинам. Наиболее характерными из них являются доплеровский сдвиг частоты сигнала, обусловленный подвижностью передатчика и приемника в радиолиниях, а также частотные погрешности передатчика и нестабильность частоты гетеродина приемника. Наличие фазового сдвига в опорном сигнале приводит к возникновению паразитной амплитудно-частотной модуляции сигнала на выходе ААС, которая в конечном итоге приведет к искажению передаваемой информации [1, 3].

Анализ известных достижений

В нестационарных условиях, характерных для бортовых ААС, фазовый сдвиг опорного сигнала в канале формирования постоянно изменяется. Непредсказуемые частотные изменения сигнала, характерные для бортовых ААС не позволяют осуществлять предварительную компенсацию фазового сдвига в опорном сигнале. Для снижения влияния паразитной модуляции на информационный процесс в ААС может применяться метод динамической

компенсации текущего фазового сдвига [2]. Вектор весовых коэффициентов ААС, обеспечивающий минимум среднего квадрата отклонения выходного сигнала от опорного в этом случае удовлетворяет уравнению

$$dW(t)/dt + 2k(\Phi + \sigma_n^2 I)W(t) = 2kR_{xd},$$

где $\Phi = A^2/2PP^T$ - корреляционная матрица полезного сигнала; A - амплитуда полезного сигнала; $P^T = [1, \exp\{-j\alpha\}, \dots, \exp\{-j\alpha(n-1)\}]$ - фазовый вектор сигнала; n - число антенных элементов в ААС, $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} dr \sin \theta$, где θ - направление прихода волны, dr - расстояние между антенными элементами, λ - длина волны, соответствующая частоте ω_0 полезного сигнала; R_{dx} - взаимная корреляционная матрица входного сигнала и опорного $d'_g(t)$, полученного с учетом динамической компенсации фазового сдвига; k - коэффициент усиления в контуре адаптации ААС; σ_n^2 - дисперсия шумов в антенных элементах. При этом опорный сигнал $d'_g(t)$ определяется в соответствии с уравнением

$$d'_g(t) = b'y(t)\omega'_g(t) / |y(t)\omega'_g(t)| = \\ = b' \left[P^T W(t) / |P^T W(t)| \right] \left[\omega'_g(t) / |\omega'_g(t)| \right] \exp\{-j\varphi\} \exp\{j\omega t\}.$$

Здесь вес ω'_g , обеспечивающий компенсацию фазового сдвига опорного сигнала, определяется в соответствии с алгоритмом

$$\frac{d\omega'_g}{dt} = -2k_g y^*(t) \varepsilon'(t),$$

где $y(t) = (A/\sqrt{2}) P^T W(t) \exp(-j\varphi) \exp(j\omega t)$, ;
 $\varepsilon'(t) = y(t)\omega'_g(t) - X^T(t)W(t)$

k_g - коэффициент усиления в контуре динамической компенсации фазового сдвига (амплитудно-фазового управления опорным сигналом). Данная динамическая компенсация фазового сдвига в канале формирования опорного сигнала в бортовых ААС в целом позволяет бороться с паразитной амплитудной и фазовой модуляцией выходного сигнала.

Выделение нерешенной проблемы

Оценка эффективности функционирования ААС с динамической компенсацией фазового сдвига в опорном сигнале выполнена в [2] для стационарного режима. Нет в литературе также результатов исследования работы такой ААС при различных параметрах алгоритмов адаптации и динамической компенсации, величины случайного фазового сдвига и сигнально-помеховой обстановки в радиолинии.

Постановка задачи

Для исследования разработаны математические модели сигналов и помех, действующих на выходе антенных элементов, и модель антенной системы, в которой реализован алгоритм (1) адаптивной обработки сигналов с компенсацией фазового сдвига опорного сигнала (алгоритм (2)). В качестве ААС моделировалась двухэлементная антенная решетка. Характеристики направленности антенных элемен-

тов предполагались изотропными. Начальные значения весовых коэффициентов выбирались так, чтобы в исходном состоянии характеристика направленности ААС была изотропной в плоскости приема полезного сигнала и помехи. Исследование адаптивной антенны осуществлялось на относительной частоте 10^6 Гц. Характеристики антенны оценивались для типовой ситуации, определяемой одним постановщиком помехи и одним источником полезного сигнала. Направления приема полезного сигнала и воздействия помехи определялись в вертикальной плоскости, перпендикулярной строительной оси ЛА, и отсчитывались против часовой стрелки от плоскости крыла. Направление воздействия помехи в указанной плоскости соответствовало 30^0 , а полезного сигнала – 300^0 , что характерно при организации связи ЛА с наземными КП при ведении РЕБ бортовыми средствами РЭП.

Цель работы

Оценка влияния таких параметров ААС как постоянной времени фильтра и коэффициента усиления в основном контуре адаптации, ширины спектра фазовых флуктуаций опорного сигнала и коэффициента усиления в канале компенсации фазового сдвига опорного сигнала на характеристики ААС и полезного сигнала, действующего на ее выходе.

Основной материал

Для наибольшей визуализации искажений выходного сигнала в качестве полезного сигнала выбирался гармонический сигнал с известными параметрами. Для количественной оценки точности воспроизведения сигнала на выходе антенны использовался нормированный средний квадрат ошибки

$$\delta = M \{ \Delta X(t)^2 \} / M \{ y_s(t)^2 \},$$

где $\Delta X(t) = y(t) - y_s(t)$, $y(t)$ - выходной сигнал антенны при наличии на входе полезного сигнала,

помехи и шумов, а $y_s(t)$ - выходной сигнал антенны при наличии на входе только полезного сигнала. Точность оценивалась ненормированным средним квадратом $M\Delta X^2 = M\{\Delta X(t)^2\}$ и средним значением $\Delta Z = y(t)/\max y(t) - y_s(t)/\max y_s(t)$, $\max \Delta Z$ и коэффициентом корреляции (кор) между процессами $y(t)$ и $y_s(t)$. Для более детальной оценки качества воспроизведения получены гистограммы ΔZ , а также спектры процессов $y(t)$ и $y_s(t)$.

Случайный фазовый сдвиг опорного сигнала моделировался в соответствии с алгоритмом

$$\phi_{i+1} = \phi_i Tf1 - Tf2(\phi_i - nf_i),$$

где $Tf1 = \exp(-\Delta t / \tau_f)$, $Tf2 = 1 - Tf1$, τ_f - величина, обратная ширине спектра процесса, описывающего фазовый сдвиг опорного сигнала, nf_i - значение дискретного белого шума на i -ой итерации, Δt - интервал дискретизации.

На первом этапе исследовалось влияние усиления K в основном контуре адаптации. Результаты этих исследований иллюстрируются на рис. 1 - 9. На рис. 1 - 3 приведены характеристики направленности ААС для трех значений коэффициента усиления $K = 32000, 8000$ и 800 .

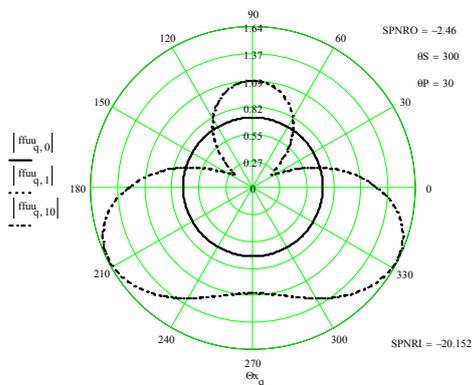


Рис. 1. Характеристики направленности ААС для значения коэффициента усиления $K = 32000$

С увеличением K процесс адаптации происходит быстрее и при $K > 32000$ ААС теряет устойчивость.

При этом отмечается возрастание флуктуаций выходного отношения сигнал\помеха+шум (SPNRO) и искажений выходного сигнала (рис. 4 - 6), характеризуемых величиной $\delta = 55.8$.

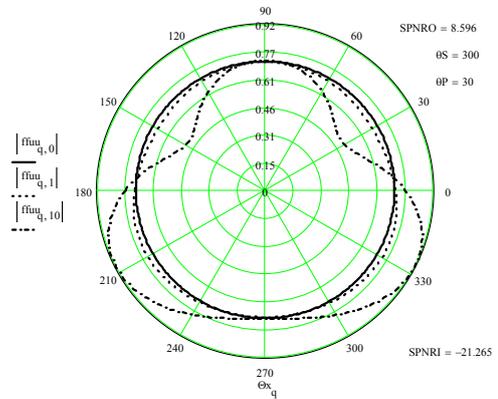


Рис. 2. Характеристики направленности ААС для значения коэффициента усиления $K = 8000$

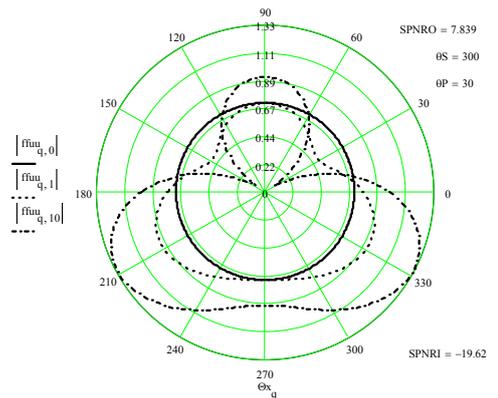


Рис. 3. Характеристики направленности ААС для значения коэффициента усиления $K = 800$

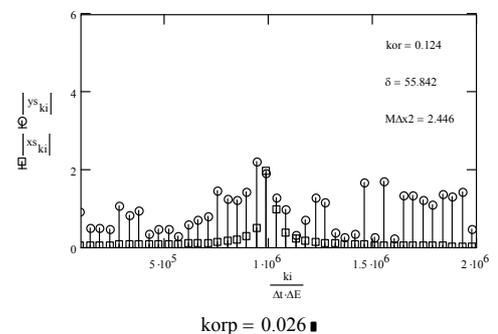
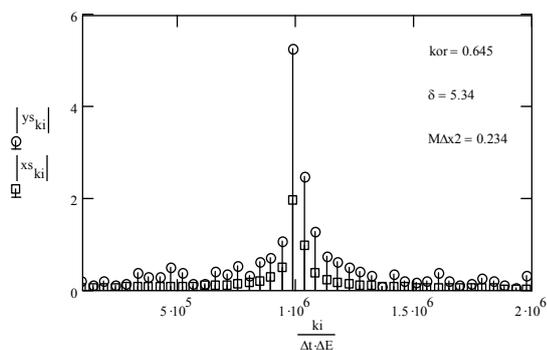


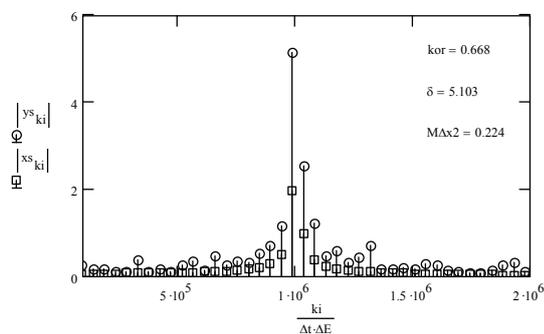
Рис. 4. График зависимости флуктуаций выходного отношения сигнал\помеха+шум и искажений выходного сигнала от значений коэффициента усиления ($K = 32000$)

При этом коэффициент корреляции $k_{ог}$ уменьшается с 0.67 до 0.12, а величины $k_{ог}$ с -0.5 до 0.026. Здесь и далее обозначения $|y_{s_k}|$ и $|x_{s_k}|$ соответствуют амплитудно-частотным спектрам выходного сигнала ААС при воздействии и отсутствии помехи.



$k_{ог} = -0.503$ ■

Рис. 5. График зависимости флуктуаций выходного отношения сигнал\помеха+шум (SPNRO) и искажений выходного сигнала от значений коэффициента усиления ($K = 8000$)



$k_{ог} = -0.438$ ■

Рис. 6. График зависимости флуктуаций выходного отношения сигнал\помеха+шум (SPNRO) и искажений выходного сигнала от значений коэффициента усиления ($K = 800$)

На рис. 7 - 9 приведены зависимости фазы весового коэффициента в канале динамической компенсации фазового сдвига опорного сигнала при различных K . Пунктиром обозначены реализации фазовых смещений опорного сигнала, соответствующие рассматриваемому моменту времени.

Из приведенных зависимостей следует, что канал компенсации фазы опорного сигнала в ААС критичен к коэффициенту усиления в основном контуре

адаптации. Установлено, что существует оптимальное значение коэффициента, при котором происходит быстрый захват фазы и обеспечивается устойчивое его отслеживание в ААС.

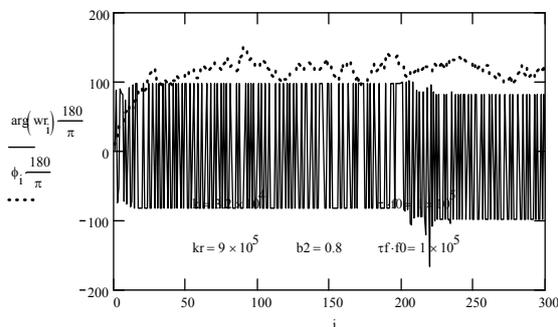


Рис. 7. График зависимости фазы весового коэффициента от значений коэффициента усиления ($K = 32000$)

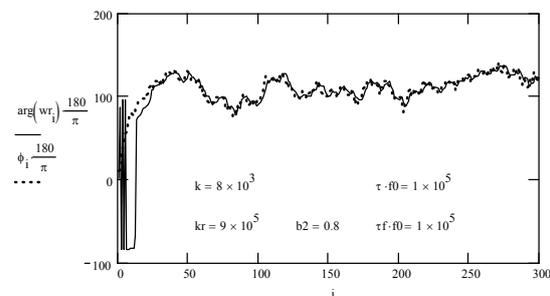


Рис. 8. График зависимости фазы весового коэффициента от значений коэффициента усиления ($K = 8000$)

При $K = 32000$ имеет место срыв синхронизации в канале опорного сигнала, но основной канал адаптации оказывается еще работоспособным. Уменьшение величины K приводит к затягиванию процесса фазирования опорного сигнала (рис. 9), что ведет к срыву синхронизации на начальном этапе фазирования. С этой точки зрения оптимальными значениями являются $K = 10000 - 20000$.

В дальнейшем оценивалось влияние усиления kr в контуре динамической компенсации фазового сдвига опорного сигнала и постоянной времени фильтров в каналах адаптации и компенсации фазового сдвига опорного сигнала. На рис. 10-12 приведены характеристики направленности ААС для различных значений усиления в контуре компенсации фазового сдвига опорного сигнала.

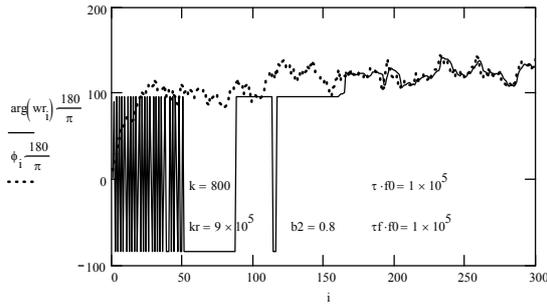


Рис. 9. График зависимости фазы весового коэффициента от значений коэффициента усиления ($K = 800$)

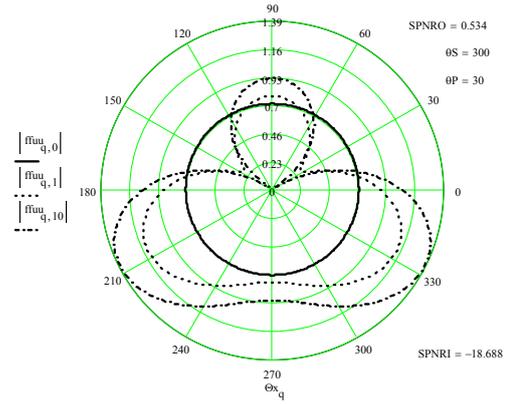


Рис. 12. Характеристики направленности ААС для значения коэффициента усиления $kr = 900$

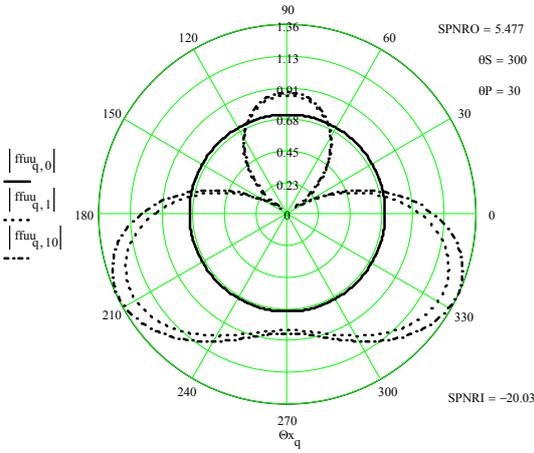


Рис. 10. Характеристики направленности ААС для значения коэффициента усиления $kr = 90000$

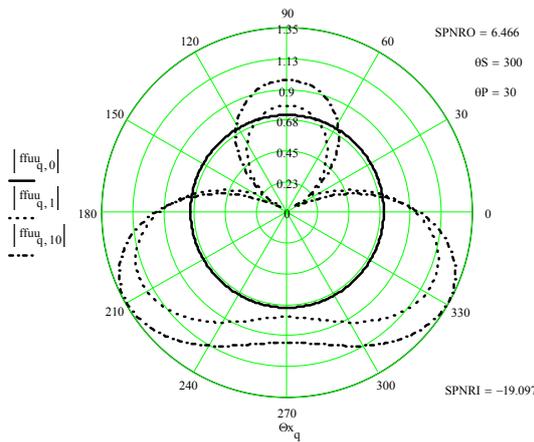
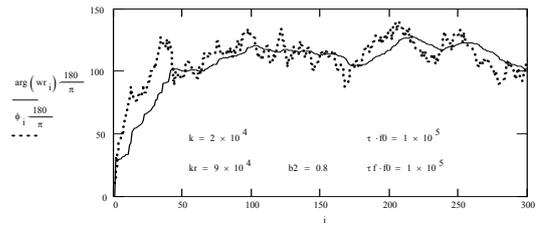


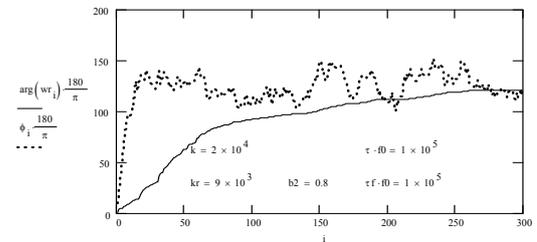
Рис. 11. Характеристики направленности ААС для значения коэффициента усиления $kr = 9000$

Из анализа приведенных зависимостей следует, что с уменьшением величины kr снижается уровень подавления помехи и скорость адаптации антенны, хотя и остается достаточно высокой. Разность $SPNRO - SPNRI$ уменьшается с 25.5 дБ до 19.2 дБ

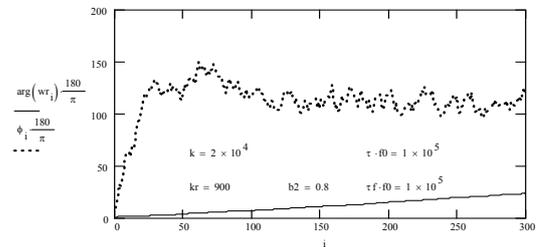
Зависимости изменения фазы весового коэффициента в канале компенсации фазового сдвига опорного сигнала от номера итерации при различных значениях kr приведены на рис. 13, а, б, в.



а) $kr = 90000$



б) $kr = 9000$



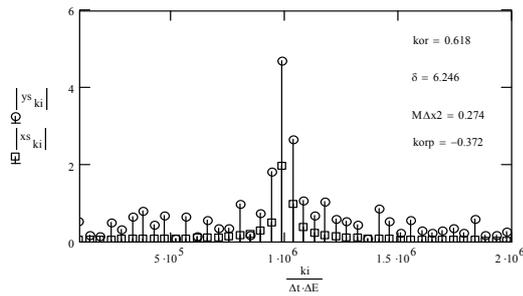
в) $kr = 900$

Рис. 13. Графики зависимости изменения фазы весового коэффициента от номера итерации при различных значениях kr

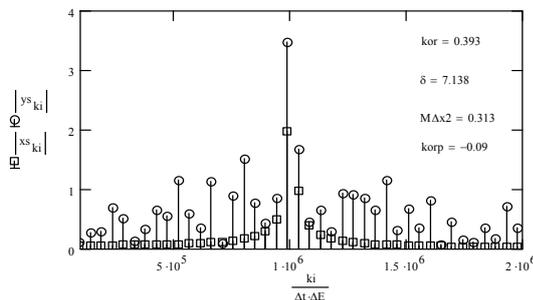
Пунктирными линиями обозначены реализации фазовых смещений опорного сигнала, соответ-

вующие рассматриваемым итерациям.

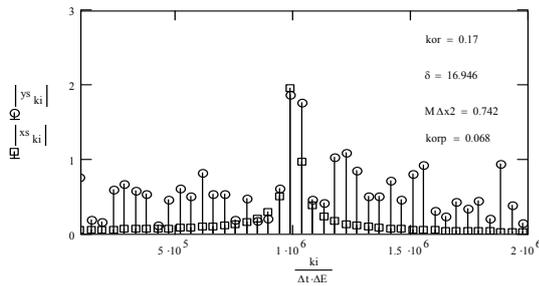
Результаты свидетельствуют о снижении способности ААС к отслеживанию фазового сдвига опорного сигнала. При этом слежение осуществляется с ошибкой, которая увеличивается с уменьшением kr (рис. 13, а, б, в). Дальнейшее уменьшение $kr < 900$ вызывает практически отключение схемы компенсации фазового сдвига. Соответствующие этому случаю спектры выходного сигнала представлены на рис. 14, а, б, в.



а) $kr = 90000$



б) $kr = 9000$



в) $kr = 900$

Рис. 14. Спектры выходного сигнала при различных значениях kr

Установлено, что с уменьшением kr снижается уровень выходного сигнала и коэффициент корреляции выходного сигнала с эталонным сигналом. Так, например, при уменьшении kr на два порядка

коэффициент корреляции изменяется от 0.68 до 0.17. При этом относительный средний квадрат ошибки воспроизведения изменяется от 6,25 до 16.95, а коэффициент корреляции выходного сигнала с помехой изменяется от -0.37 до 0.07.

На следующем этапе исследовалось влияние постоянной времени фильтра в контуре адаптации. На рис. 15 изображены характеристики направленности ААС при относительной величине постоянной фильтра $\tau f_0 = 10^6$ и остальных исходных данных, аналогичных рис. 1. Видно, что при этом снижается быстродействие системы, которое вызывает уменьшение выходного относительного среднего квадрата ошибки воспроизведения (-2.34 дБ).

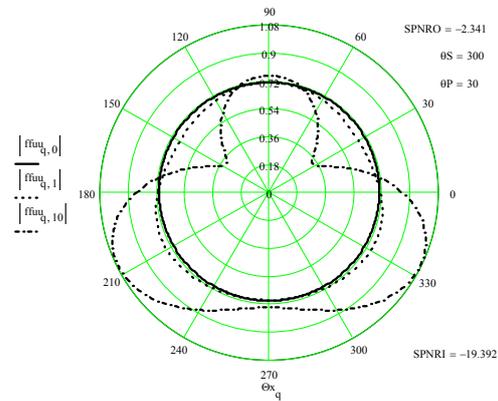


Рис. 15. Характеристики направленности ААС при относительной величине постоянной фильтра $\tau f_0 = 10^6$

Кроме этого, увеличивается ошибка слежения за фазой опорного сигнала, которая также дополнительно искажает в выходной сигнал (рис. 16).

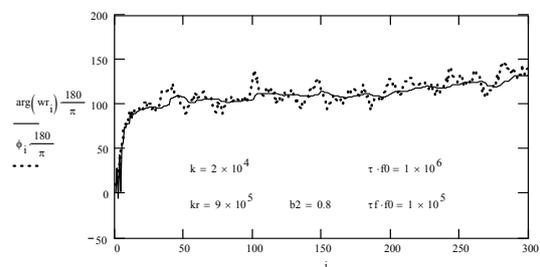


Рис. 16. Ошибка слежения за фазой опорного сигнала

В результате относительный средний квадрат ошибки воспроизведения достигает 10.25, коэффициент корреляции выходного сигнала с эталонным

сигналом равен -0.16 , а с помехой - 0.59 (рис. 17).

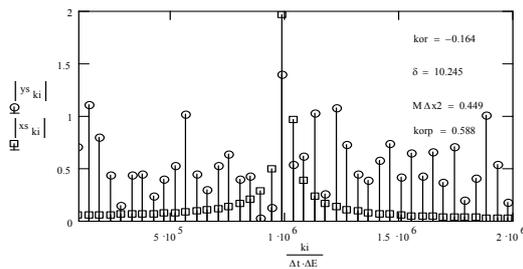


Рис. 17. Значения среднего квадрата ошибки воспроизведения

Расширение полосы флуктуаций случайного фазового сдвига при формировании опорного сигнала вызывает периодические срывы в слежении за фазой (рис. 18). В результате расширяется спектр выходного сигнала (рис. 19). В этом случае $kor = 0.13$, $korp = 0.15$, а относительный средний квадрат ошибки воспроизведения составляет 13.74 .

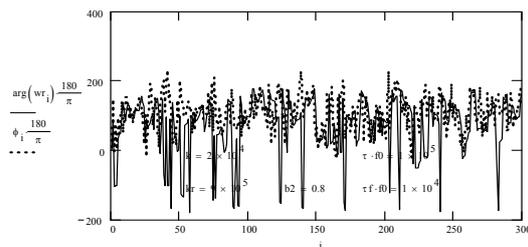


Рис. 18. Срывы в слежении за фазой опорного сигнала

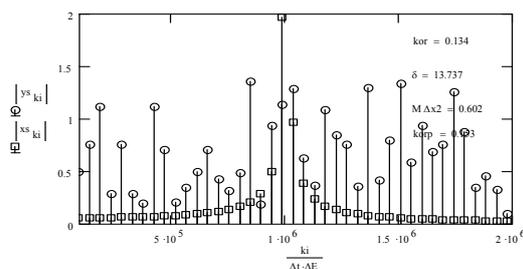


Рис. 19. Спектр выходного сигнала

На заключительном этапе оценивалось влияние коэффициента усиления $B2$ на характеристики ААС. Установлено, что при $B2 > 1$ имеет место возбуждение ААС и потеря устойчивости процесса адаптации в целом. Характеристики направленности ААС при $B2 < 1$ ($B2 = 0.08$) изображены на рис. 20.

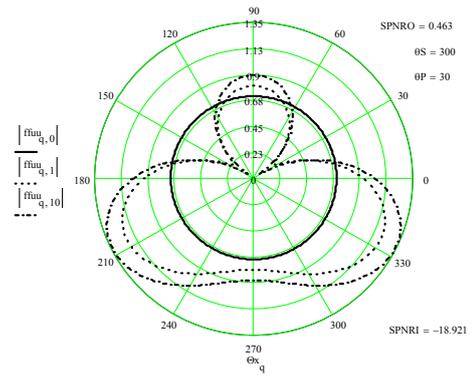


Рис. 20. Характеристики направленности ААС при $B2 < 1$ ($B2 = 0.08$)

В данном случае антенна адаптируется, но процесс компенсации фазового сдвига опорного сигнала осуществляется с ошибкой (рис. 21).

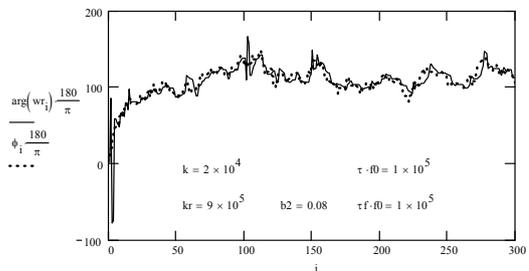


Рис. 21. Ошибка процесса компенсации фазового сдвига опорного сигнала

В результате имеет место снижение SPNRO (0.46 дБ). В этом случае $kor = 0.29$, $korp = 0.03$, а относительный средний квадрат ошибки воспроизведения составляет 7.32 . На рис. 22 приведены реализации спектров выходного сигнала антенны и эталонного сигнала.

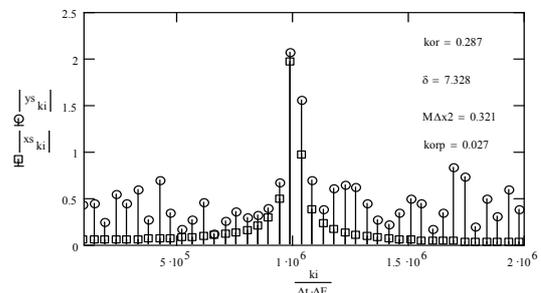


Рис. 22. Реализации спектров выходного сигнала антенны и эталонного сигнала

Из рис. 22 следует, что ошибки в точности компенсации фазового сдвига опорного сигнала и в этом случае приводят к амплитудным, фазовым и

частотным искажениям полезного сигнала на выходе ААС.

Заключение

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о работоспособности исследуемой ААС с компенсацией фазового сдвига опорного сигнала. Компенсация фазового сдвига опорного сигнала в целом обеспечивает повышение выходного отношения сигнал/помеха+шум на 7-9 дБ по сравнению со случаем отсутствия компенсации. При этом более чем вдвое повышается точность воспроизведения принимаемого полезного сигнала на выходе антенны. Это обеспечивается за счет устранения паразитной амплитудной, фазовой и частотной модуляции выходного сигнала. Однако результаты моделирования свидетельствуют и о том, что ААС имеет наибольшую эффективность лишь при определенных значениях параметров алгоритмов адаптации и компенсации фазового сдвига опорного сигнала. Значения указанных параметров оказываются связанными с энергетическими параметрами сигналов и помех, действующих на входе (выходе) антенных элементов ААС. Это означает, что в нестационарной обстановке указанные параметры должны изменяться, т.е. должна предусматриваться их соответствующая подстройка. Установлено, что наиболее важными из указанных параметров являются коэффициенты усиления в основном контуре адаптации ААС и в

устройстве компенсации фазового сдвига. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на модернизацию рассмотренных выше алгоритмов с учетом возможности их применения в нестационарной обстановке. Прежде всего, это касается уровня и направлений приема полезного сигнала и помех, которые изменяются в процессе функционирования рассматриваемых радиолиний.

Литература

1. Лосев Ю.И., Бердников А.Г., Гойхман Э.Ш., Сизов Б.Д. Адаптивная компенсация помех в каналах связи. - М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
2. Bar-Ness Y. Eliminating reference loop shift in adaptive arrays. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1982, AES - 18, 115 - 123.
3. Поспелов Б.Б., Казначеев В.А. Анализ влияния фазового сдвига в опорном сигнале на эффективность функционирования адаптивных антенных решеток в интегрированной авиационной бортовой радиоэлектронной аппаратуре связи, навигации и опознавания //Збірник наукових праць. - Харків: ХВУ, 2002. Вип.1(39).-С. 74-77.

Поступила в редакцию 14.10.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Минервин Н.Н., Харьковский военный университет, г. Харьков