

УДК 621.396.677

И.Е. Шумейко, А.Д. Флоров, А.А. Лоскутов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПОМЕХИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ АНТЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Получены численные выражения для определения коэффициента подавления автокомпенсатором активных шумовых помех для различных характеристик антенн основного и вспомогательного каналов. Проанализированы зависимости коэффициента подавления от соотношения геометрических размеров основной и вспомогательной антенн, величины разнеса их фазовых центров, угла прихода сигнала помехи при заданных дисперсиях фазовых флуктуаций фронта волны помехового сигнала и их радиуса корреляции.

Ключевые слова: коэффициент подавления, фазовые флуктуации, дисперсия, корреляция.

Введение

Анализ литературы. Для решения задачи борьбы с помехами как правило используются многоканальные радиолокационные системы. При определении коэффициента подавления в таких системах исходят из предположения, что фронт волны помехового сигнала является плоским [1].

Для получения численных оценок коэффициента подавления помехи от статистических характеристик фазовых флуктуаций фронта волны при реализации алгоритмов пространственно-временной обработки будем рассматривать корреляционный компенсатор внешних помех с учетом пространственной когерентности помехового сигнала. Типовая схема компенсации помехи изображена на рис. 1.

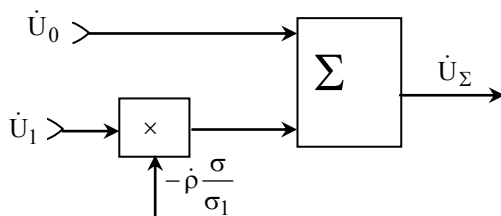


Рис. 1. Схема компенсации помехи

Корреляционный компенсатор содержит основную и вспомогательную антенны, сумматор и перемножитель во вспомогательном канале. Для помеховых напряжений будем использовать метод комплексных амплитуд: в основном и вспомогательном каналах они обозначены соответственно \dot{U}_0 и \dot{U}_1 , а на выходе схемы – \dot{U}_Σ . В установленном режиме оптимальное значение коэффициента передачи вспомогательного канала $-\dot{\rho}\sigma/\sigma_1$ определяется среднеквадратическими отклонениями σ и σ_1 напряжений основного и вспомогательного каналов соответственно и коэффициентом корреляции этих напряжений $\dot{\rho} = \langle \dot{U}_0 \dot{U}_1^* \rangle / \sigma \sigma_1$. При этом отношение дисперсии напряжения помехи в основном

канале σ^2 к дисперсии напряжения на выходе компенсатора σ_Σ^2 называется коэффициентом подавления [1]:

$$\eta = \frac{\sigma^2}{\sigma_\Sigma^2} = \frac{1}{1 - |\dot{\rho}|^2}.$$

Это отношение тем меньше, чем выше степень корреляции помеховых напряжений в основном и вспомогательном каналах.

Ослабление корреляции этих напряжений определяется независимыми факторами: собственными шумами в каналах, ошибками настройки и нестабильностью параметров каналов, а также случайными искажениями фронта помеховой волны в турбулентной тропосфере и при отражении от подстилающей поверхности [2]. Поэтому **целью данной статьи** является анализ влияния фазовых флуктуаций помехи на работу автокомпенсатора (АК).

Основной раздел

При моделировании работы АК в условиях искажений фронта волны помехового сигнала за основу принята антенная система, обобщенная схема которой изображена на рис. 2.



Рис. 2. Обобщенная схема антенной системы АК

В состав антенной системы входит одна АР и две диаграммо-образующие схемы (ДОС). Антенна, входящая в состав АК, представляет собой линейную эквидистантную антенную решетку. Предполагается, что помеха действует по первому боковому лепестку ДН антенны основного канала (рис. 3).

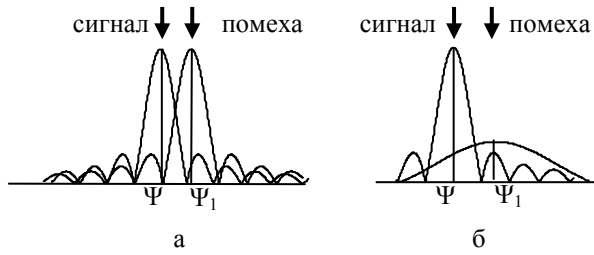


Рис. 3. Диаграмма направленности основной и вспомогательной антенн

Рис. 3, а соответствует случаю, когда размеры антенн основного и вспомогательного каналов одинаковы $L = L_1$ и направление главного максимума ДН антенны вспомогательного канала совпадает с направлением на помеху. Рис. 3, б соответствует случаю, когда антенны основного и вспомогательного каналов сонаправлены и имеют разные размеры $L > L_1$.

Для оценки величины декорреляции и коэффициента подавления в рассматриваемых случаях воспользуемся зависимостями, полученными в [3] для линейных антенн.

Для принятых на рис. 3, а обозначений получим:

$L=L_1, \Psi=0$ – направление главного максимума ДН основного канала,

$\Psi_1 \neq 0$ – направление главного максимума ДН вспомогательного канала.

Квадрат коэффициента корреляции напряжения помехи в основном U_{n0} и вспомогательном U_{n1} каналах описывается выражением:

$$\rho_n^2 = \frac{\langle U_{n0} U_{n1} \rangle^2}{\langle U_{n0}^2 \rangle \langle U_{n1}^2 \rangle}. \quad (1)$$

Коэффициент ковариации имеет вид:

$$\langle U_{n0} U_{n1} \rangle^2 = \left[\frac{\exp(-a) \cos(b_1 L / 2) \operatorname{sha} + a}{a^2} \right]^2, \quad (2)$$

дисперсии описываются выражениями:

$$\langle U_{n0}^2 \rangle = \frac{\exp(-2a) - 2a - 1}{2a^2}; \quad (3)$$

$$\langle U_{n1}^2 \rangle = \exp(-2a) F^2(b_1 L / 2) + \frac{2a - \exp(-2a)}{2((b_1 L / 2)^2 + a^2)} + \frac{(b_1 L / 2)^2 - a^2}{2[(b_1 L / 2)^2 + a^2]^2}, \quad (4)$$

где $a = \tilde{a}L/2$ – параметр, определяющий влияние искажений фронта помеховой волны на эффективность подавления помехи антенной системой;

$\tilde{a} = \sigma_\phi^2 / \rho_\phi$ – параметр, характеризующий искажения фронта помеховой волны;

σ_ϕ^2 – дисперсия флуктуаций фазы;

ρ_ϕ – корреляция фазовых флуктуаций;

$b_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \Theta_1$ – регулярное изменение фазы на

единичной длине апертуры антенны;

Θ – угол места постановщика помех.

Соответственно для рис. 3, б, т.е. когда антенны основного и вспомогательного каналов сонаправлены и имеют разные размеры $L_0 > L_1$, получим:

$$\langle U_{n0} U_{n1} \rangle^2 = \left[\frac{\exp(-\tilde{a}L) \operatorname{Lsh}(\tilde{a}L_1)}{(\tilde{a}L)^2 L_1} + \frac{1}{\tilde{a}L} \right]^2;$$

$$\langle U_{n0}^2 \rangle = \frac{\exp(-2\tilde{a}L) 2\tilde{a}L - \exp(-2\tilde{a}L) - 1}{(\tilde{a}L)^2 2(\tilde{a}L)^2};$$

$$\langle U_{n1}^2 \rangle = \frac{\exp(-2\tilde{a}L_1) 2\tilde{a}L_1 - \exp(-2\tilde{a}L_1) - 1}{(\tilde{a}L_1)^2 2(\tilde{a}L_1)^2}.$$

В случае разнесения фазовых центрах антенн основного и вспомогательного каналов при моделировании работы АК рассматривается вариант, когда помеха действует по первому боковому лепестку ДН антенны основного канала, антенны основного и вспомогательного каналов имеют разные размеры и их фазовые центры разнесены на величину $\ell = L - L_1$.

Коэффициент ковариации для варианта построения антенной системы, когда основная и вспомогательная антенны не пересекаются при $\Psi=0$ имеет вид:

$$\dot{K}(\ell) = e^{-\tilde{a}\ell} \frac{\operatorname{sha}}{a} \frac{\operatorname{sha}_1}{a_1}, \quad (5)$$

где $a_1 = \tilde{a}L_1$.

Для случая, когда апертуры основной и вспомогательной антенн пересекаются:

$$\dot{K}(\ell) = e^{-a} \frac{\operatorname{sha}_1}{aa_1} \operatorname{ch}\tilde{a}\ell + \frac{\operatorname{sha}_1}{aa_1} \cos b\ell + j \frac{\operatorname{sha}_1}{aa_1} \sin b\ell. \quad (6)$$

Для случая, когда апертура вспомогательной антенны частично вынесена за пределы основной, а другая часть элементов антенн общая:

$$\begin{aligned} \dot{K}(\ell) = e^{-a} & \frac{\operatorname{sh}[(a+a_1-\tilde{a}\ell)/2]}{a_1} \frac{\operatorname{ch}[(a-a_1+\tilde{a}\ell)/2]}{a} + \\ & + \frac{1}{a} \frac{\sin[(\psi_1 - b\ell)/2]}{\psi_1} e^{j(\psi_1 + b\ell)/2} + \\ & + e^{-(a+a_1+\tilde{a}\ell)/2} \frac{\operatorname{sh}(-a+a_1+\tilde{a}\ell)}{a_1} \frac{\operatorname{sha}}{a}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для всех вышеприведенных вариантов дисперсии рассчитываются в соответствии с выражениями:

$$\langle U_{n0}^2 \rangle = \frac{\exp(-2\tilde{a}L) 2\tilde{a}L - \exp(-2\tilde{a}L) - 1}{(\tilde{a}L)^2} ;$$

$$\langle U_{n1}^2 \rangle = \frac{\exp(-2\tilde{a}L_1) 2\tilde{a}L_1 - \exp(-2\tilde{a}L_1) - 1}{(\tilde{a}L_1)^2} .$$

Для моделирования напряжений помехи после излучателей основной и вспомогательной антенн, которые поступают на входы соответствующих ДОС, использовалась следующая процедура.

Как было определено выше в состав антенной системы входит две антенны и две ДОС. Антенны, входящие в состав антенной системы, представляют собой линейные эквидистантные антенные решетки. Количество элементов в АР основной антенны равно M_0 , а вспомогательной M_1 . При этом линейные размеры основной и вспомогательной антенн равны соответственно $L = d(M_0 - 1)$ и $L_1 = d(M_1 - 1)$, где d – шаг АР. Разнос в пространстве фазовых центров антенн равен $\ell = dk$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Напряжения помехи с элементов основной и вспомогательной антенн подаются на входы соответствующих диаграммо-образующих схем.

При моделировании работы устройств компенсации АШП в условиях искажения фронта волны помехового сигнала рассматривались различные (в зависимости от соотношения L_1/L и значения ℓ) схемы антенной системы.

Полученные выше аналитические зависимости и разработанная имитационная модель, позволяющая формировать выборки напряжений на выходе ДОС основного и вспомогательного каналов с флуктуациями фазы помехового сигнала с заданными корреляционной функцией и статистическими характеристиками помехи дают возможность определить величину декорреляции флуктуаций и связанный с ней коэффициент подавления помехи для различных вариантов построения АК. При этом входными данными являются следующие величины: размер основной антенны $L = dM_0$, размер вспомогательной антенны $L_1 = dM_1$, обобщенный угол b , обусловленный направлением прихода помехи, разнос фазовых центров основной и вспомогательной антенн $\ell \geq 0$.

Фиксируя значения одних величин и задавая диапазон изменения значений других величин, с помощью выбранного способа моделирования можно проанализировать влияние различных факторов на эффективность работы АК в условиях флуктуаций фронта волны помехи.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента подавления от статистических характеристик флуктуаций фазы помехового сигнала.

При оценке эффективности работы АК в усло-

виях флуктуаций фазы помехи, обусловленных искажениями фронта ее волны, для удобства анализа выбран обобщенный параметр $a = \tilde{a}L$. Направление прихода помехи задано таким, что она воздействует по максимуму первого бокового лепестка ДН основной антенны. При этом максимум главного лепестка вспомогательной антенны направлен строго на помеху. Амплитудное распределение напряжений – линейное, закон корреляции флуктуаций фазы – треугольный.

На рис. 4 представлены результаты имитационного моделирования для случая, когда антенны основного и дополнительного каналов имеют одинаковые размеры и их фазовые центры совмещены (размер выборки составляет 5000 значений).

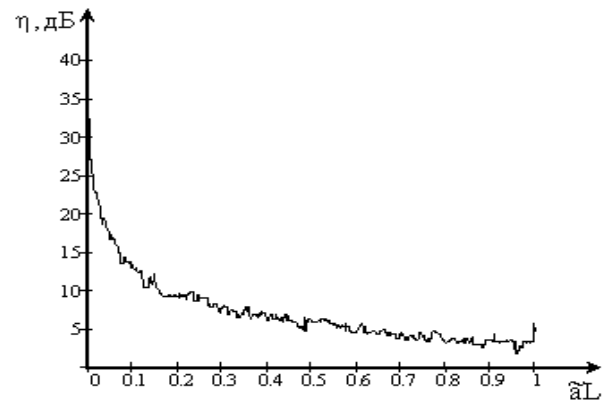


Рис. 4. Зависимость коэффициента подавления помехи от параметра $\tilde{a}L > 1$

Анализ зависимости коэффициента подавления помехи η от параметра $\tilde{a}L$ показывает, что при малых значениях параметра $\tilde{a}L \leq 0,05$ коэффициент подавления помехи η асимптотически стремится к значению 40 дБ, которое соответствует случаю отсутствия фазовых флуктуаций.

При значениях $\tilde{a}L > 1$ коэффициент подавления уменьшается до 2 дБ. Это обозначает, что при больших флуктуациях фазы помехи АК практически не компенсирует напряжение помехового сигнала в основном канале.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента подавления помехи от соотношения размеров вспомогательной и основной антенн. На практике используются различные виды антенных систем АК в смысле соотношения размеров основной и вспомогательной антенн.

При моделировании диапазон изменения отношения размера вспомогательной антенны к размеру основной был выбран в пределах $L_1/L = 0,02 \dots 1$.

На рис. 5 представлены результаты расчетов коэффициента подавления помехи η , полученные

при трех значениях параметра $\tilde{a}L$. Предполагается, что фазовые центры антенн совмещены, т.е. $\ell = 0$; количество элементов АР в основном канале $M_0 = 100$, в компенсационном $M_1 = 0,02M_0 \dots M_0$. Амплитудное распределение напряжений – линейное, закон корреляции флуктуаций фазы – треугольный.

При этом помеха воздействует по максимуму первого бокового лепестка ДН основной антенны, а максимум главного лепестка ДН вспомогательной антенны направлен на источник помехи.

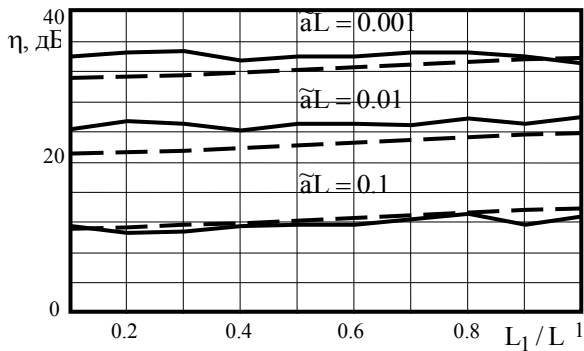


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента подавления помехи от соотношения размеров основной и вспомогательной антенн

Штриховыми линиями представлены зависимости, полученные расчетным путем с использованием выражений, приведенных в [3], сплошными показаны результаты имитационного моделирования (размер выборки составляет 5000 значений).

Анализ графиков, изображенных на рис. 5, выявил следующие особенности.

Во-первых, максимальное значение коэффициента подавления η_{\max} соответствует случаю когда

$$L_1 = L_{1\max} = L,$$

минимальное для

$$L_1 = L_{1\min} = 0,02L.$$

Во-вторых, разность между максимальным и минимальным значениями коэффициента подавления составляет

$$\eta_{\max} - \eta_{\min} < 3 \text{ дБ}.$$

В-третьих, увеличение коэффициента подавления помехи η наблюдается с уменьшением параметра $\tilde{a}L$, которое связано с тем, что фронт волны помехи стремится к плоскому.

Разница в коэффициенте подавления для предельных расчетных значений $\tilde{a}L$ составляет величину порядка 20 дБ.

В-четвертых, дополнительные исследования также показали, что существенное увеличение η наблюдается в пределах значений L_1/L от 0,02 до 0,1 при разных значениях параметра $\tilde{a}L$. При

$L_1/L > 0,1$ изменения коэффициента подавления незначительны.

В-пятых, чем больше значение параметра $\tilde{a}L$, тем меньше разность $\eta_{\max} - \eta_{\min}$.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента подавления помехи от величины разнеса фазовых центров основной и вспомогательной антенн.

Данные зависимости получены при трех значениях параметра $\tilde{a}L$, $M_0 = M_1 = 20$, $\ell = 0 \dots 10L$. Помеха, как и прежде, воздействует по первому боковому лепестку ДН основной антенны, а максимум ДН вспомогательной антенны направлен на источник помехи.

Амплитудное распределение напряжений – равномерное, закон корреляции – треугольный.

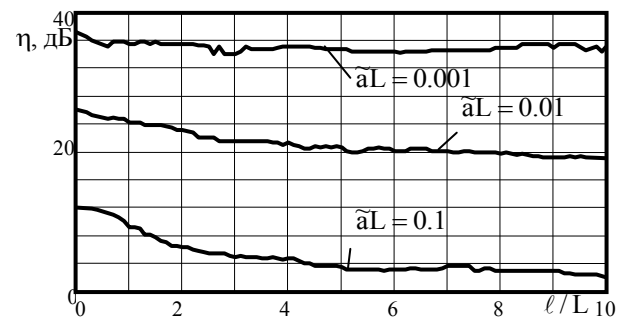


Рис. 6. Зависимость коэффициента подавления помехи от соотношения величины разнеса фазовых центров и размеров основной антенны

Анализ графиков на рис. 6 показывает, что с увеличением разнеса фазовых центров основной и вспомогательной антенн ℓ коэффициент подавления помехи η уменьшается. Например, при $\tilde{a}L = 0,1$ коэффициент подавления уменьшился на 10 дБ при увеличении ℓ/L на порядок. При уменьшении значения параметра $\tilde{a}L$ (фронт волны стремится к плоскому) разность между минимальным и максимальными значениями коэффициента подавления помехи η будет уменьшаться, а при росте параметра $\tilde{a}L$ – увеличиваться.

Таким образом, чем больше разнос фазовых центров антенн, тем сильнее влияют фазовые флуктуации помехового сигнала, обусловленные искажениями его фронта волны, на эффективность подавления помехи в основном канале.

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента подавления помехи от направления ее прихода для различных значений показателя $\tilde{a}L$.

Представленные выше результаты влияния различных факторов на эффективность работы АК в условиях флуктуаций фронта волны помехи относятся к случаю, когда помеха воздействует по максимуму первого бокового лепестка ДН основной антенны.

Определенный интерес представляет вопрос о величине коэффициента подавления η в случае, если помеха приходит с других направлений.

Диапазон значений $b = 0.1 \dots 10$ охватывает часть главного и первые два боковых лепестка ДН основной антенны. При этом максимум ДН вспомогательной антенны направлен на источник помехи.

Анализ графиков на рис. 7 показывает, что при значениях b , соответствующих нулям ДН основной антенны, коэффициент подавления принимает значения, близкие к 0 дБ.

Объяснить это можно тем, что при воздействии помехи в области нулей ДН основной антенны уровень самой помехи в основном канале АК соизмерим с уровнем внутренних шумов. Это приводит к выработке неправильного значения управляющего напряжения либо к запираанию вспомогательного канала АК в следствии декорреляции напряжений помехи между вспомогательным и основным каналами. В результате напряжение помехи в основном канале проходит на выход АК без компенсации, поэтому коэффициент подавления η стремится к единице.

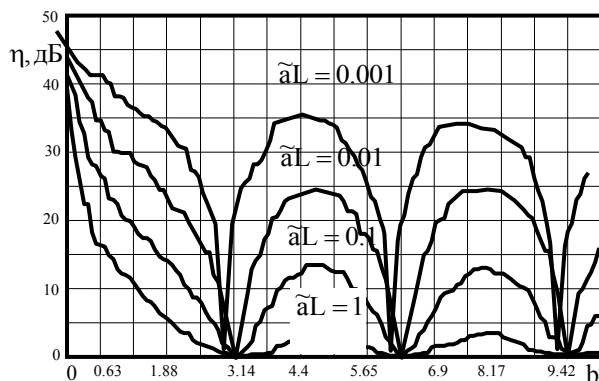


Рис. 7. Зависимости коэффициента подавления от обобщенного угла b

Выводы

Отдельный интерес представляет качественный сравнительный анализ эффективности работы АК при различных ДН вспомогательной антенны. Очевидно, что чем уже ДН вспомогательной антенны, тем больше коэффициент подавления помехи. Однако на практике широко используются антенные системы, для которых размеры вспомогательной антенны меньше основной, а ее ДН такова, что главный лепесток перекрывает либо все, либо большую часть боковых лепестков ДН основной антенны. Поскольку вспомогательная антенна зачастую выполняет и другие функции, например, управление и контроль над полетом зенитной управляемой ракеты, то в этом случае максимум ДН вспомогательной антенны должен быть направлен туда же куда и максимум ДН основной антенны, а не в сторону источника помехи.

Список литературы

1. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Флоров А.Д. Определение статистических характеристик флуктуаций фазы помехового сигнала при его распространении в турбулентной тропосфере с учетом подстилающей поверхности / А.Д. Флоров, И.Е. Шумейко // Системи управління, навігації та зв'язку, 2009. – № 4(12). – С. 56-60.
3. Минервин Н.Н. Влияние случайных искажений в тропосфере помеховой волны на эффективность ее подавления корреляционным компенсатором / Н.Н. Минервин // Радиотехника. – Х.: ХНУРЕ, 2006. – Вып. 147. – С. 149-156.

Поступила в редколлегию 17.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Ермаков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВПЛИВ ФАЗОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ ЗАВАДИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ АВТОКОМПЕНСАТОРІВ З РІЗНИМИ АНТЕННИМИ СИСТЕМАМИ

І.Є. Шумейко, О.Д. Флоров, А.А. Лоскутов

Отримані чисельні вирази для визначення коефіцієнта подавлення автокомпенсатором активних шумових завод для різних характеристик антен основного і допоміжного каналів. Проаналізовані залежності коефіцієнта подавлення від співвідношення геометричних розмірів основної і допоміжної антен, величини розносу їхніх фазових центрів, кута приходу сигнала завади при заданих дисперсіях фазових флуктуацій фронту хвилі заводового сигналу і їх радіуса кореляції.

Ключові слова: коефіцієнт подавлення, фазові флуктуації, дисперсія, кореляція.

INFLUENCE OF HANDICAP PHASE FLUCTUATIONS ON THE EFFICIENCY OF WORK AUTOSCRAPES WITH DIFFERENT ANTENNA SYSTEMS

I.Y. Shumeiko, A.D. Florov, A.A. Loskutov

Numeral expressions for determination of suppression coefficient of active noise handicaps an autoscray for different descriptions of the basic and auxiliary channels antennas are got. Dependences of suppression coefficient from correlation of basic and auxiliary aeriels geometrical sizes, size of their phase centers shift, corner of arrival of handicap signal at the set dispersions of phase fluctuations of wavefront handicap signal and their radius of correlation are analysed.

Keywords: suppression coefficient, phase fluctuations, dispersion, correlation