

УДК 621.396.677

И.Е. Шумейко, А.Д. Флоров, Н.А. Яловега

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ НАЛИЧИИ ФЛУКТУАЦИЙ ФРОНТА ВОЛНЫ ПОМЕХИ

Получены численные выражения для характеристик направленности адаптивной АР автокомпенсатора при наличии флуктуаций фазы помехового сигнала. Проанализированы возможности формирования «нулей» в диаграмме направленности приемной антенной решетки в зависимости от соотношения спектральной плотности помехи и внутренних шумов; от среднего квадратического отклонения (СКО) флуктуаций фазы помехового сигнала при фиксированном значении коэффициента корреляции напряжений в основном и вспомогательном каналах; от коэффициента корреляции при фиксированном значении СКО.

Ключевые слова: характеристика направленности, фазовые флуктуации, корреляция напряжений

Введение

Анализ литературы. В литературе рассматривается вопрос синтеза алгоритмов обработки принимаемого сигнала на фоне мешающего сигнала и внутреннего шума. Однако в этих алгоритмах не учитывается влияние фазовых флуктуаций мешающего сигнала, обусловленных флуктуациями фронта волны [1]. В этой связи известные алгоритмы обработки при наличии фазовых флуктуаций мешающего сигнала могут не обеспечить достаточной компенсации последнего. Наличие флуктуаций фазы помехового сигнала, возникающих на трассе распространения сигнала [2] приводит к тому, что в диаграмме направленности адаптивной антенной решетки (АР) при приеме не формируется «нуля» в направлении на помеху. Поэтому **целью данной статьи** является анализ характеристик направленности АР при наличии флуктуаций фронта волны помехи и внутренних шумов основного и вспомогательного каналов автокомпенсатора.

Основная часть

Для выявления влияния флуктуаций фазы помехового сигнала рассмотрим случай, когда принимаемый полезный сигнал $\bar{X}(t, \Theta_0)$ считается когерентным и характеризуется направлением угла прихода Θ_0 . Мешающий сигнал $\bar{X}_1(t, \Theta_1, \phi)$ действует по первому боковому лепестку ДН антенной решетки и отличается от полезного сигнала интенсивностью, углом прихода Θ_1 и наличием флуктуационной составляющей фазы фронта волны ϕ . Будем полагать, как это делается в аналогичных случаях, что внутренние шумы в элементах АР некоррелированы (белый шум), а корреляционная матрица шумов имеет вид [1]:

$$K_{ш} = N_0 \bar{I} \delta(t-s),$$

где N_0 – спектральная плотность мощности внутреннего шума;

\bar{I} – единичная матрица, размерность которой равна количеству элементов АР;

$\delta(t-s)$ – дельта-функция.

Предполагается также, что взаимное запаздывание принимаемых колебаний на элементах решетки невелико и выражается лишь во взаимном сдвиге фаз принимаемых сигналов. В этом случае оптимальная пространственно-временная обработка может подразделяться на пространственную (антенную) и временную (внутриприемную).

Ограничимся рассмотрением только пространственной обработки. Пространственные модели полезного и мешающего сигналов соответственно имеют вид:

$$\bar{X}(\Theta_0) = \left\| \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \Theta_0 (i-1)\right) \right\|; \quad (1)$$

$$\bar{X}_1(\Theta_1, \phi) = \left\| \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \Theta_1 (i-1)\right) \exp(-j\phi_i) \right\|, \quad (2)$$

где i – номер элемента АР; ϕ_i – флуктуационная составляющая фазы в i -м канале; λ – рабочая длина волны.

Рассмотрим случай, когда фазовые флуктуации распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, а их корреляционная матрица имеет вид:

$$K = \sigma^2 \left\| \rho^{|l-m|} \right\|,$$

где σ^2 – дисперсия фазовых флуктуаций мешающего сигнала; ρ – коэффициент корреляции между двумя соседними элементами АР; l – номер столбца; m – номер строки.

Известно, что корреляционная матрица мешающего сигнала находится в результате проведения статистического усреднения элементов матрицы вида:

$$\bar{A} = \left\langle \bar{X}_1(\Theta_1, \phi) \bar{X}_1^*{}^T(\Theta_1, \phi) \right\rangle. \quad (3)$$

Для проведения операции статистического усреднения используем свойства характеристических

функцій [3]. Введя означення $t_1 = -1$; $t_2 = 1$; $z = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \Theta_1\right)$, перепишем значение вектора мешающего сигнала и комплексно сопряженного ему вектора в следующем виде для четырехэлементной АР:

$$\bar{X}_1(\Theta_1, \bar{\Phi}) = \begin{pmatrix} z^{(1-1)} \exp(j\phi_1 t_1) \\ z^{(2-1)} \exp(j\phi_2 t_1) \\ z^{(3-1)} \exp(j\phi_3 t_1) \\ z^{(4-1)} \exp(j\phi_4 t_1) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Подставляя выражения (4) в (3), получим корреляционную матрицу мешающего сигнала с учетом флуктуаций фронта волны для четырехэлементной антенной решетки:

$$\bar{A} = M\left\{\bar{X}_1(\Theta_1, \bar{\Phi})\bar{X}_1^*T(\Theta_1, \bar{\Phi})\right\} = \begin{pmatrix} 1 & z^1 e^{-\sigma^2(1-\rho)} & z^2 e^{-\sigma^2(1-\rho^2)} & z^3 e^{-\sigma^2(1-\rho^3)} \\ z^{-1} e^{-\sigma^2(1-\rho)} & 1 & z^1 e^{-\sigma^2(1-\rho)} & z^2 e^{-\sigma^2(1-\rho^2)} \\ z^{-2} e^{-\sigma^2(1-\rho^2)} & z^{-1} e^{-\sigma^2(1-\rho)} & 1 & z^1 e^{-\sigma^2(1-\rho)} \\ z^{-3} e^{-\sigma^2(1-\rho^3)} & z^{-2} e^{-\sigma^2(1-\rho^2)} & z^{-1} e^{-\sigma^2(1-\rho)} & 1 \end{pmatrix}$$

Корреляционная матрица суммарной помехи $\bar{\Phi}$ в случае, когда внутренний шум и мешающий сигнал являются независимыми величинами, сводится к сумме корреляционных матриц внутреннего шума и мешающего сигнала:

$$\bar{\Phi} = N_0 \bar{I} + N_1 \bar{A}, \quad (5)$$

где N_1 – энергетический параметр, характеризующий мощность мешающего сигнала.

Для синтеза алгоритма оптимальной обработки используем следующее выражение для достаточной статистики [1]:

$$\dot{Y}_\Sigma = \bar{Y}^T \bar{R}^*(\Theta_c, \Theta_1), \quad (6)$$

где \dot{Y}_Σ – комплексная амплитуда весовой суммы; \bar{Y}^T – вектор-строка комплексных амплитуд, принимаемых элементами антенной решетки; $\bar{R}^*(\Theta_c, \Theta_1)$ – вектор-столбец комплексных весовых множителей; Θ_c, Θ_1 – пространственные параметры ожидаемого сигнала и помехи.

Для рассматриваемого случая имеем:

$$\bar{Y} = \bar{X}(\Theta_c), \quad (7)$$

где $\bar{R}^*(\Theta_c, \Theta_1) = \bar{\Phi}^{-1} \bar{X}^*(\Theta_0)$. (8)

Подставляя корреляционную матрицу помех

$\bar{\Phi}$ в выражение для весового вектора (8) в (7), а соотношения (7) в выражение (6), получим выражение для результирующей характеристики направленности:

$$\Psi(\Theta_c) \equiv \left| \bar{X}^T(\Theta_c) \bar{\Phi}^{-1} \bar{X}^*(\Theta_0) \right|, \quad (9)$$

где $\bar{X}(\Theta_c)$ – вектор-столбец принимаемого полезного сигнала;

$\bar{X}(\Theta_0)$ – вектор-столбец ожидаемого сигнала.

В [1] приведено выражение для характеристики направленности АР при отсутствии фазовых флуктуаций помехового сигнала:

$$\Psi(\Theta_c) \equiv \left| \dot{\rho}(\Theta_c, \Theta_0) - \frac{N_1}{1+N_1} \dot{\rho}(\Theta_c, \Theta_1) \dot{\rho}(\Theta_1, \Theta_0) \right|, \quad (10)$$

где $\dot{\rho}(\Theta_c, \Theta_0)$ – характеристика направленности, согласованная с ожидаемым сигналом;

$\dot{\rho}(\Theta_c, \Theta_1)$ – характеристика направленности, согласованная с помеховым сигналом;

$\dot{\rho}(\Theta_1, \Theta_0)$ – весовой множитель.

Приведенное выражение позволяет определить характеристики направленности основного канала для плоского фронта волны и разной мощности помехового сигнала, рассчитанные в соответствии с выражением (10). Результаты исследований представлены на рис. 1. График 1 соответствует случаю, когда мешающий сигнал существенно превышает по мощности внутренний шум ($N_1 \gg 1$); график 2 – случаю, когда внутренние шумы соизмеримы по мощности с мешающим сигналом ($N_1 = 1$); график 3 – случаю, когда помеховый сигнал отсутствует ($N_1 = 0$).

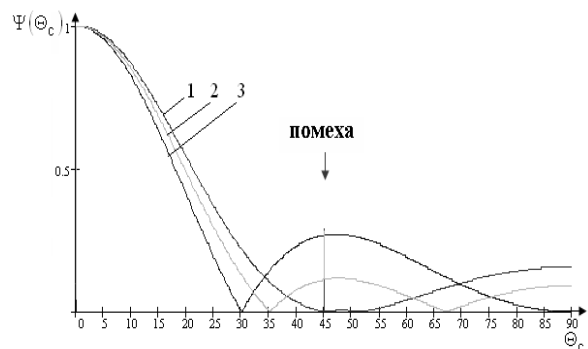


Рис. 1. Характеристика направленности АР при отсутствии фазовых флуктуаций мешающего сигнала

Из рис. 1 видно, что для эффективного подавления помехи адаптивной АР путем создания провала в ДН основного канала необходимо, чтобы мощность помехи превосходила более, чем на 20% мощность внутренних шумов приемной системы.

При наличии флуктуаций фронта волны помехового сигнала оценим эффективность работы авто-

компенсатора. На рис. 2 представлена характеристика направленности адаптивной АР для различных значений СКО флуктуаций фазы помехового сигнала, рассчитанные в соответствии с выражениями (5), (8), (9) при фиксированном значении радиуса корреляции напряжений в основном и вспомогательном каналах $\rho_{\Pi} = 0,9$. График 1 соответствует значению $\sigma_{\phi} = 0,01$; график 2 – $\sigma_{\phi} = 1$; 3 – $\sigma_{\phi} = 2$; 4 – $\sigma_{\phi} = 3$; 5 – $\sigma_{\phi} = 4$; 6 – $\sigma_{\phi} = 10$.

Из приведенного графика следует, что возможность эффективного подавления помехового сигнала ограничена. Так, при увеличении значений СКО флуктуаций фазы наблюдается увеличение уровня второго бокового лепестка (вместо провала), по которому действует помеха. Значительное (на 2 порядка) увеличение СКО флуктуаций фазы на трассе распространения может быть вызвано в первую очередь неровностями рельефа местности, что характерно при наблюдении маловысотных целей.

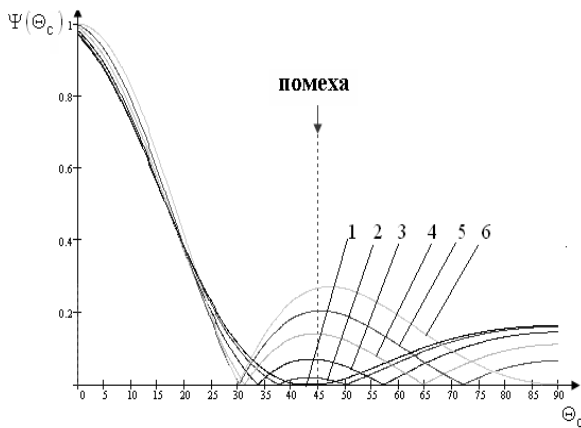


Рис. 2. Характеристика направленности адаптивной АР при различных значениях СКО флуктуаций фазы при $\rho_{\Pi} = 0,9$

На рис. 3 представлена характеристика направленности адаптивной АР для различных значений коэффициентов корреляции напряжений в основном и вспомогательном каналах при фиксированном значении СКО $\sigma_{\phi} = 0,01$, рассчитанные в соответствии с выражениями (5), (8), (9). График 1 соответствует значению $\rho_{\Pi} = 1$; график 2 – $\rho_{\Pi} = 0,99$; 3 – $\rho_{\Pi} = 0,9$; 4 – $\rho_{\Pi} = 0,85$; 5 – $\rho_{\Pi} = 0,8$; 6 – $\rho_{\Pi} = 0,7$.

Как видно из рис. 3, изменение характеристики направленности адаптивной АР при уменьшении коэффициента корреляции происходит по аналогии с рис. 2. В качестве общего вывода полученных результатов можно сказать, что при больших значениях фазовых флуктуаций фронта волны мешающего сигнала компенсация помехи не происходит. Форма характеристики направленности совпадает с формой, представленной на рис. 2 для случая, когда помеха отсутствует.

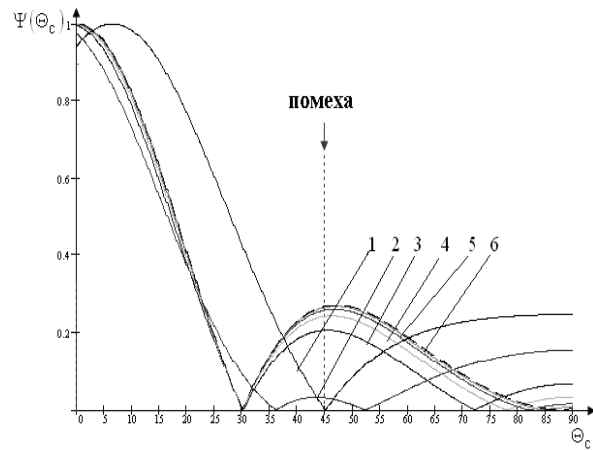


Рис. 3. Характеристика направленности адаптивной АР при различных значениях коэффициента корреляции напряжений в каналах при $\sigma_{\phi} = 0,01$

При значении коэффициента корреляции, равном $\rho_{\Pi} = 1$, и малом значении СКО флуктуаций фазы следует ожидать надежного подавления помехи адаптивной АР: уровень бокового лепестка стремится к нулю в направлении на источник мешающего сигнала. В противном случае, наличие фазовых флуктуаций мешающего сигнала приводит к ухудшению компенсации помехи: увеличению уровня бокового лепестка ДН антенной решетки и его расширению.

Выводы

В соответствии с вышесказанным в дальнейшем необходимо предусмотреть возможность дополнительной компенсации мешающего сигнала в схеме автокомпенсации помехи при различных вариантах построения корреляционных компенсаторов, для которых входными напряжениями являются выходные со схемы ДОС. Принцип работы и алгоритмы обработки этих АК должен учитывать наличие фазовых флуктуаций в помеховом сигнале.

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. – К.: ЦНДІ, 2009. – № 4(12). – С. 56-60.
3. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

Поступила в редколлегию 21.01.2010

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

**АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАНOSTІ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ
ПРИ НАЯВНОСТІ ФЛУКТУАЦІЙ ФРОНТА ХВИЛІ ЗАВАДИ**

І.Є. Шумейко, О.Д. Флоров, М.О. Яловега

Отримані чисельні вирази для характеристик спрямованості адаптивної антенної решітки автокомпенсатора при наявності флуктуацій фази завадового сигналу. Проаналізовані можливості формування «нулів» в діаграмі спрямованості приймальної антенної решітки в залежності від співвідношення спектральної густини завади і внутрішніх шумів; від середнього квадратичного відхилення (СКВ) флуктуацій фази завадового сигналу при фіксованому значенні коефіцієнта кореляції напруги в основному і допоміжному каналах; від коефіцієнта кореляції при фіксованому значенні СКВ.

Ключові слова: характеристика спрямованості, фазові флуктуації, кореляція напруг.

**ANALYSIS OF THE ARRAY ORIENTATION CHARACTERISTICS
AT PRESENCE OF WAVEFRONT HANDICAP FLUCTUATIONS**

I.Ye. Shumeiko, A.D. Florov, N.A. Yalovega

Numeral expressions for autoscray adaptive array orientation characteristics at presence of handicap phase fluctuations are got. Possibilities of «zeros» forming are analyzed in the pattern receiving array depending on correlation of spectral density of handicap and internal noises; from mean quadratic deviation (MCD) of phase fluctuation at the fixed value of correlation coefficient of tensions mainly and auxiliary channels; from the correlation coefficient of at the fixed value MCD.

Keywords: characteristics description, phase fluctuations, correlation of tensions.