

Кудряшова Анна Алексеевна,
аспирант, РГРТУ им. В.Ф. Уткина,
Рязань

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ КОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ С ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Аннотация: В статье рассматривается работа оптимального компенсатора помех с фокусировкой, получены диаграммы направленности.

Ключевые слова: Компенсатор помех, цифровая фокусировка, маломощные помехи, spoofing.

В настоящее время наблюдается бурный рост различных радиотехнических устройств и систем, условия работы которых характеризуются сложной помеховой обстановкой. Наиболее опасными являются маломощные помехи, которые называют spoofing. Такие помехи сложно отличить от полезного сигнала, так как по своим характеристикам они похожи на аутентичный сигнал. В борьбе с ними нужно использовать отличительные особенности, а именно направление прихода, так как чаще всего spoofing помехи имеют направление прихода с линии горизонта. Ранее были рассмотрены методы подавления таких помех [1,2].

Повышение требований к уровню достоверности информации влечет за собой необходимость использования различных методов защиты от помех. Компенсация помех является одним из методов борьбы с маломощными помехами. Наиболее полно принцип компенсации был изложен в [3] и базируется на двухканальном методе приема: в первом канале содержится полезный сигнал и помеха, а во втором канале только помеха, полезный сигнал максимально ослаблен. Снижение уровня помехи без значительного ослабления полезного сигнала достигается путем сложения сигналов с двух каналов в противофазе. В результате разработки антенных решеток (АР) появилась возможность использовать обобщение данного метода в условиях многоканального приема.

Целью данной работы является получение диаграммы направленности компенсатора помех с цифровой фокусировкой.

В работе рассматривается работа оптимального компенсатора помех с фокусировкой, при моделировании используется кольцевая антенная решетка, все антенные элементы которой расположены по окружности.

Сигнал на выходе антенной решетки будет представлять собой совокупность комплексных огибающих сигнала и помехи [4]:

$$\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{S}} + \underline{\mathbf{N}}. \quad (1)$$

Вектор полезного сигнала будет иметь вид:

$$\underline{\mathbf{S}} = s_0 \underline{\mathbf{V}}_0. \quad (2)$$

Направление прихода полезного сигнала будет задаваться направляющим вектором:

$$\underline{\mathbf{V}}_0 = \{e^{j\varphi_{01}}, e^{j\varphi_{02}}, \dots, e^{j\varphi_{0N}}\}, \quad (3)$$

$$\varphi_{0n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \sin \gamma_0 (x_n \cos \alpha_0 + y_n \sin \alpha_0) \quad (4)$$

Помехи описываются собственными направляющими векторами:

$$\underline{\mathbf{V}}_m = \{e^{j\varphi_{m1}}, e^{j\varphi_{m2}}, \dots, e^{j\varphi_{mM}}\}, \quad (5)$$

$$\varphi_{0m} = -\frac{2\pi}{\lambda} \sin \gamma_m (x_n \cos \alpha_m + y_n \sin \alpha_m) \quad (6)$$



Угол места γ_m и азимут α_m задаются исходя из особенностей spoofing-помех, зная что такая помеха приходит почти всегда с линии горизонта, можно предположить чему будет равен угол γ_m .

Вектор весовой пространственной обработки будет равен:

$$\underline{W} = \underline{V}_0^H \underline{R}_N^{-1}, \quad (7)$$

где \underline{R}_N – матрица пространственной корреляции помех на выходе АР.

В классическом антенном компенсаторе помех (АКП) можно выделить два вида антенн: основную антенну, содержащую полезный сигнал и помехи, и дополнительные антенны, не содержащие полезный сигнал. В таком компенсаторе сигнал из основной антенны подается сразу на сумматор, а сигналы из дополнительных антенн сначала взвешиваются. Такую компенсацию помех называют адаптивным формирователем нулей (АФН) [5], так как на все источники сигналов будут сформированы нули диаграмм направленности. Если полезный сигнал будет находиться только в основном канале, то такая компенсация помех будет вполне эффективна. В реальных условиях это часто не выполняется.

При воздействии маломощной помехи наиболее эффективное подавление можно получить с помощью оптимальной обработки сигнала. Антенная решетка в таком случае состоит из основной антенны и нескольких вспомогательных антенн, формирующих нули диаграмм направленности. Для предотвращения подавления полезного сигнала, сначала осуществляется подавление помехи в каждом пространственном канале, потом производится фокусировка на источник полезного сигнала. Необходимо, чтобы полезный сигнал присутствовал только на одном из выходов схемы фокусировки, а на всех остальных выходах полезный сигнал был равен нулю.

На рисунке 1 представлена структурная схема компенсатора помех с цифровой фокусировкой [6].

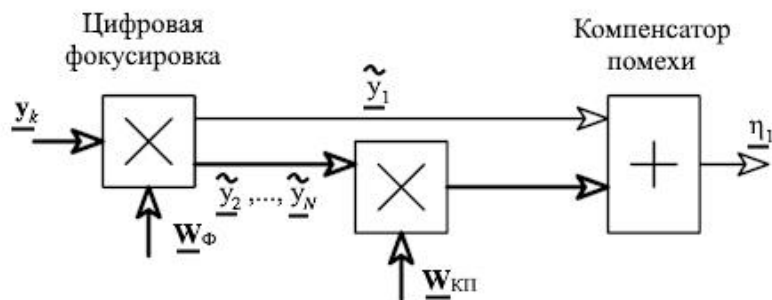


Рис. 1. Структурная схема компенсатора помех с цифровой фокусировкой

Вектор весовой пространственной обработки фокусирующего фильтра представим таким образом, что полезный сигнал будет находиться в одном канале, пусть первом, а в остальных каналах сигнал будет отсутствовать:

$$\underline{W}_\phi = \begin{bmatrix} \frac{\underline{V}_0^H}{|\underline{V}_0|^2} \\ \underline{G}_1^H \\ \dots \\ \underline{G}_{N-1}^H \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где вектора \underline{V}_0 и \underline{G}_0 ортогональны. В качестве вектора \underline{G}_0 может быть использована матрица \underline{P} , которая представляет собой оператор проецирования на подпространство, ортогональное вектору \underline{V}_0 .

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \frac{\mathbf{V}_0 \mathbf{V}_0^H}{\mathbf{V}_0^H \mathbf{V}_0} \quad (9)$$

Свойство отсутствия полезного сигнала в компенсационных каналах можно записать в виде:

$$\mathbf{W}_\phi \mathbf{V}_0 = \begin{pmatrix} \frac{\mathbf{V}_0^H}{|\mathbf{V}_0|^2} \\ \mathbf{G}_1^H \\ \dots \\ \mathbf{G}_{N-1}^H \end{pmatrix} \mathbf{V}_0 = \begin{pmatrix} \frac{\mathbf{V}_0^H \mathbf{V}_0}{|\mathbf{V}_0|^2} \\ \mathbf{G}_1^H \mathbf{V}_0 \\ \dots \\ \mathbf{G}_{N-1}^H \mathbf{V}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Так как полезный сигнал находится только в первом канале, в остальных каналах присутствуют помехи, коррелированные с помехами в первом канале, то каналы $2, \dots, N$ можно использовать для компенсации:

$$\eta_1 = y_1 + \sum_{n=2}^N W_n y_n \quad (11)$$

Оптимальный весовой вектор компенсатора будет иметь вид:

$$\mathbf{W}_{КП} = \{W_n, n = 2, \dots, N\} \quad (12)$$

При расчете оптимального весового вектора компенсатора, нужно учитывать измеренную в результате фокусировки матрицу пространственной корреляции помех и шумов:

$$\mathbf{R}_C = \mathbf{W}_\phi \mathbf{R}_C \mathbf{W}_\phi^H \quad (13)$$

В результате преобразования (11) будет изменяться только уровень помех на выходе без изменения уровня полезного сигнала. В таком случае выбор весовых коэффициентов по критерию минимума мощности выходной помехи даст максимум отношения сигнал-помеха.

Построим диаграмму направленности:

$$D(\gamma) = \frac{|\eta_1(\gamma)|}{\max |\eta_1(\gamma)|} \quad (14)$$

где $\eta_1(\gamma)$ – сигнал на выходе компенсатора помех при различных углах места γ .

Сигнал на выходе будет получен как произведение вектора весового коэффициента на сигнал с выхода АР:

$$\eta_1(\gamma) = \mathbf{W} \mathbf{Y}_0(\gamma) = \mathbf{W} \mathbf{S}(\gamma) \quad (15)$$

Сигнал на выходе АР можно представить в виде

$$\mathbf{S}(\gamma) = s_0 \mathbf{V}_0(\gamma) \quad (16)$$

Тогда на выходе компенсатора сигнал будет иметь вид:

$$\eta_1(\gamma) = \begin{pmatrix} y_1 \\ \mathbf{W}_{КП} \begin{pmatrix} y_2 \\ \dots \\ y_N \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_\phi(1, \dots) \mathbf{Y} \\ \mathbf{W}_{КП} \begin{pmatrix} \mathbf{W}_\phi(2, \dots) \mathbf{Y} \\ \dots \\ \mathbf{W}_\phi(N, \dots) \mathbf{Y} \end{pmatrix} \end{pmatrix} = |\mathbf{W}_\phi(1, \dots) + \mathbf{W}_{КП} \mathbf{W}_\phi(2 \dots N, 1)| \mathbf{Y} \quad (17)$$



На рисунке 2 представлены диаграммы направленности кольцевой антенной решетки: опорная ДН показана пунктирной линией, когда АР настроена на направление прихода полезного сигнала и нет воздействия помех, и ДН с фокусировкой показана сплошной линией. Кругом на графике отмечен угол прихода помехи, в направлении помехи был сформирован минимум диаграммы направленности. Помеха имеет мощность, значительно превышающую мощность полезного сигнала. При направлении помехи 60° главный максимум диаграммы направленности не искажается, помеха полностью подавляется. На рисунке 3 показаны диаграммы направленности при направлении помехи 40° , в этом случае помеха также хорошо подавляется, но наблюдается небольшой сдвиг главного максимума ДН.

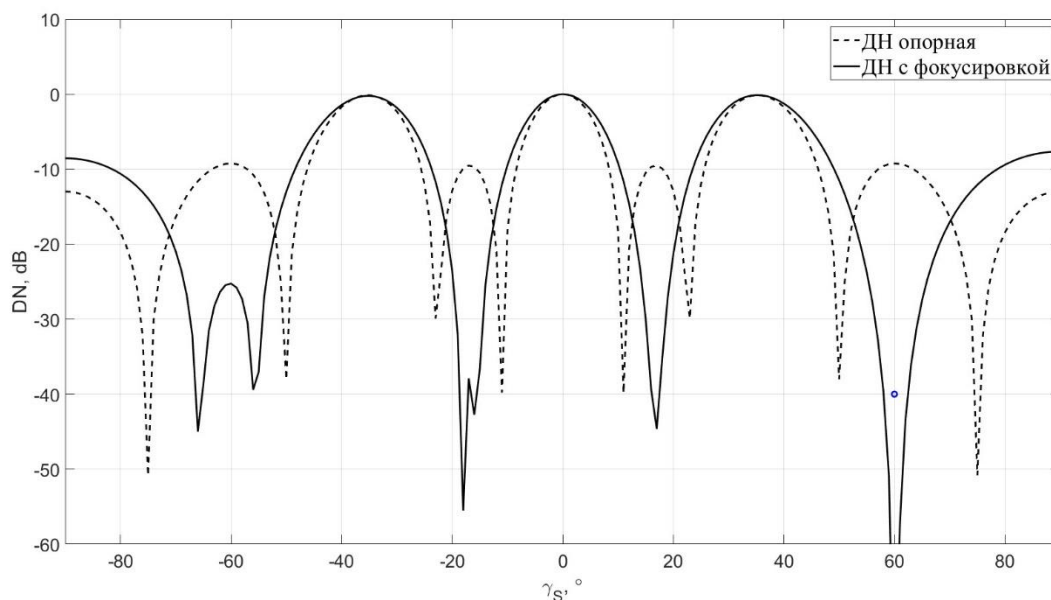


Рис. 2. ДН с фокусировкой при угле прихода помехи 60°

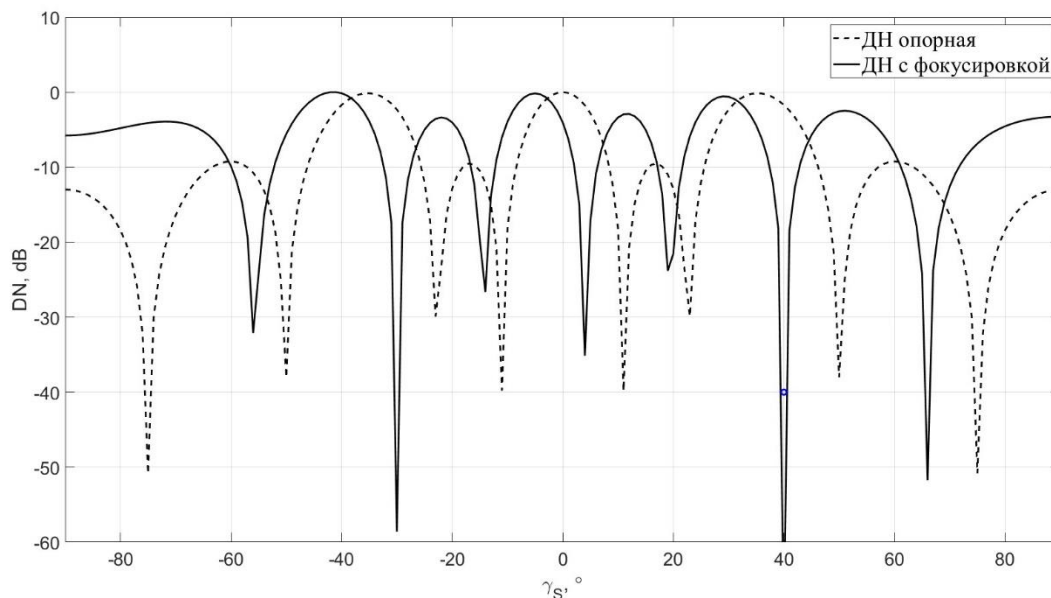


Рис. 3. ДН с фокусировкой при угле прихода помехи 40°

На рисунке 4 представлены диаграммы направленности при угле прихода маломощной помехи 40° , как видно из графика в направлении помехи также строится минимум диаграммы направленности.

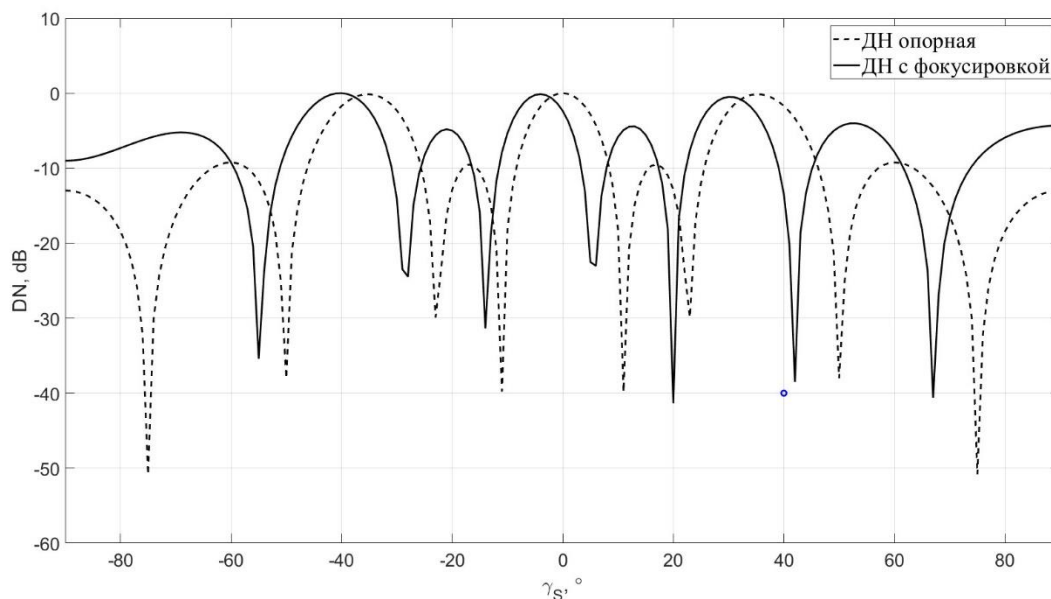


Рис. 4. ДН с фокусировкой при угле прихода маломощной помехи 40°

В данной работе был рассмотрен метод компенсации помех с фокусировкой. Данный метод дает высокую помехозащищенность, отношение сигнал-помеха будет максимальным, маломощные помехи также подавляются.

Список литературы:

1. А.А. Кудряшова. Пространственное подавление Spoofing-помех в радионавигационных системах // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.1./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 85-88.
2. А.А. Кудряшова. Оптимальная пространственная обработка сигналов при воздействии помех в азимутальной плоскости // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов; Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина. 2023.С. 147.
3. Папалекси Н.Д. Радиопомехи и борьба с ними. – М.-Л.: Гостехиздат, 1944. – 103 с
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М: Радиотехника, 2010. 800 с, ил.
5. Ефименко В.С., Харисов В.Н. Адаптивные формирователи лучей для повышения помехоустойчивости приемников СРНС // Радиотехника, №7, 2008.
6. Паршин Ю.Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех: учеб. пособие. – М.: КУРС, 2021. – 200 с.

