

ильева, Н. С. Сотникова, М., 1989. [17] Пытьев Ю. П. Математические методы интерпретации физического эксперимента. М., 1990. [18] Гладун В. В., Пирогов Ю. А., Пытьев Ю. П., Сердобольская М. Л. // Тез. докл. 9-й Всесоюз. конф. «Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях». М., 1989. Ч. 2. С. 144. [19] Пытьев Ю. П., Чуличков А. И. ЭВМ анализирует изображение. М.: «Знание», 1988. № 5.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 4

УДК 621.391

АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С УГЛОВОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ СИГНАЛА И ПОМЕХ В КОСМИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

В. В. Балинов, Ю. В. Березин, Н. В. Потапова

Разработана математическая модель адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией (ААР с УПС) радиосигналов; в рамках этой модели исследовано качество работы такой решетки на космической линии радиосвязи при приеме полностью поляризованных полезного сигнала и помехи в присутствии аддитивного шума. Показано, что ААР с УПС обеспечивает в среднем выигрыш в отношении сигнал/(помеха+шум) не меньше 10 дБ даже в самом неблагоприятном случае приема, когда сигнал и помеха идут с одного направления.

Введение

Принципы построения адаптивных антенных решеток (ААР), предназначенных для улучшения качества приема полезного сигнала в присутствии помех, известны [1]. Наиболее часто отличительными признаками принимаемых электромагнитных полей служат частотный спектр или направление прихода. Однако известно, что таким признаком может быть и поляризация электромагнитного поля [2—5].

Весьма перспективно использование углов прихода и поляризации как совместных отличительных признаков разных полей одной частоты, так как при этом число независимых параметров в пространстве действительных переменных, с помощью которых описывается векторное поле $E(\omega)$, возрастает с двух до четырех — кроме угла места (θ) и азимута (ϕ), определяющих направление прихода волны, появляется фазор поля $P = \text{Re} P + i \text{Im} P$, характеризующий его поляризацию.

В этом случае диаграмма направленности ААР должна быть определена в пространстве четырех переменных $F(\theta, \phi, \text{Re} P, \text{Im} P)$. Очевидно, что это существенно расширяет возможности раздельного приема волн одной частоты.

Постановка задачи

Один из возможных принципов оптимальной обработки смеси полезного сигнала и помехи — это их селекция по совокупности углового и поляризационного признаков. Этот принцип может быть реализован с помощью соответствующей адаптивной антенной решетки.

Пусть адаптивная антенная решетка с угловой и поляризационной селекцией (ААР с УПС) расположена на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ), находящегося на геостационарной орбите. Источники векторных полей полезного сигнала и нескольких помех одной частоты расположены на поверхности Земли, видимой с ИСЗ. Идеали-

зируем космический канал связи и будем считать, что рассеяние и деполаризация распространяющихся в нем радиоволн отсутствуют.

Допустим, что поляризация помех априори неизвестна, а сигнала — известна.

Цель работы:

1) сформулировать принципы построения и функционирования ААР с УПС, работающей на линии радиосвязи при отсутствии какой-либо априорной информации о помехах;

2) создать математическую модель ААР с УПС и исследовать с ее помощью эффективность работы такой решетки в условиях космической линии связи.

Структурная схема адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией

ААР с УПС можно сконструировать так, чтобы ее диаграмму направленности можно было оптимизировать независимо для приема полезного сигнала и помехи. Такое решение позволяет обеспечить на выходе ААР постоянный максимум мощности полезного сигнала и, вообще говоря, переменный минимум мощности помехи. Для достижения этой цели ААР с УПС составлена из двух подрешеток (рис. 1),

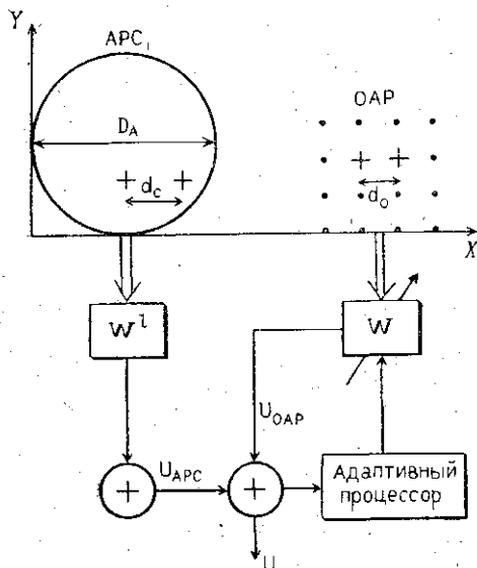


Рис. 1

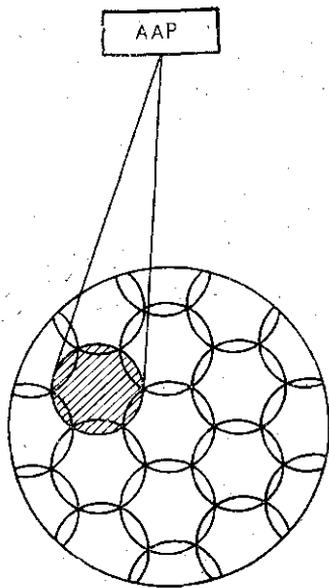


Рис. 2

Рис. 1. Структура адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией электромагнитных полей; APC и OAP составлены из поляризационно-чувствительных антенных элементов (крестики), размещенных в круглом и квадратном окне; W^l — вектор весовых коэффициентов в системе формирования лепестка диаграммы направленности APC с номером l ; W — управляемый вектор весовых коэффициентов, объединяющий APC и OAP в ААР; U_{APC} , U_{OAP} — отклики APC и OAP соответственно; U — отклик всей ААР

Рис. 2. Общая и локальные зоны радиообслуживания геостационарным ИСЗ на поверхности Земли

одна из которых (антенная решетка сигнальная (АРС)) предназначена для оптимального приема полезного сигнала. Каждый антенный элемент АРС представляет собой пару ортогональных диполей, объединенных системой сложения с комплексным весовым коэффициентом W_7 (на рис. 1 не показан), одинаковым для всех элементов.

Антенные элементы АРС разнесены по двум ортогональным направлениям X, Y с шагом d_c ; решетка состоит из 49 антенных элементов, размещенных в круге диаметром $D_A=8,5d_c$ и объединенных в одну устройством системой весового сложения с набором векторов весовых коэффициентов W' , каждый из которых обеспечивает фазирование АРС для приема плоской волны с определенного направления (число антенных элементов и диаметр D_A определяются из требований к ширине главного и уровню боковых лепестков диаграммы направленности АРС).

Диаграмма направленности АРС имеет многолепестковую структуру. Общая зона обслуживания системой космической связи на поверхности Земли составлена из ряда локальных зон круглой формы и с геостационарной орбиты видна под углом $\pm 12^\circ$. Требование равномерного распределения энергии радиосигнала на поверхности Земли приводит к необходимости использования гексагональной структуры общей диаграммы АРС (рис. 2). Число локальных зон (число лепестков в общей диаграмме направленности АРС) подчиняется условию

$$l=1+3n(n+1), \quad n=1, 2, 3, \dots$$

В рассматриваемой модели АРС принято $l=19$; в этом случае диаметр локальной зоны D_l связан с диаметром общей зоны обслуживания D соотношением

$$D_l=D/2\sqrt{3}.$$

Вторая подрешетка (опорная антенная решетка (ОАР)) предназначена для выделения необходимого для работы ААР опорного сигнала в виде копии помехи. ОАР составлена из поляризационно-чувствительных антенных элементов, аналогичных элементам АРС. Две подрешетки объединены в одну адаптивную антенную решетку, обеспечивающую автоматическое подавление некоторого числа помех при отсутствии какой-либо априорной информации о них. Максимальное число независимых помех, которые может подавить ААР, равно числу антенных элементов в ОАР.

В рассматриваемой модели число антенных элементов ОАР равно 16 и размещены они на плоскости эквидистантно по двум ортогональным направлениям X, Y с шагом d_0 . Выходные напряжения с нагрузок антенных элементов ОАР умножаются скалярно на 16 регулируемых комплексных весовых коэффициентов (вектор W на рис. 1) и суммируются, образуя выходной сигнал ОАР.

Математическая модель адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией

Пусть в локальном базисе (e_θ, e_ϕ, e_0) плоская эллиптически поляризованная волна задана двумя проекциями вектора E : E_θ и E_ϕ .

Определим отклик АРС, сфазированный на направление (θ_l, ϕ_l) , на волну, идущую с направления (θ, ϕ) . Этот отклик будет соответствовать одному лепестку с индексом l в многолепестковой диаграмме направленности АРС:

$$U_{\text{APC}} = F_{\text{APC}} (W_1 E_x + W_2 E_y) = F_{\text{APC}}^T W_{\text{APC}}^T \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = F_{\text{APC}}^T W_{\text{APC}}^T L \begin{pmatrix} E_\phi \\ E_\psi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $F_{\text{APC}}^T = \sum_{j=1}^{49} W_j^T \exp\{-ik(\theta, \varphi) r_j\}$ — отклик на плоскую скалярную волну, идущую с направления (θ, φ) , $W^T = \{W_j^T\}$ — вектор весовых коэффициентов, обеспечивающий фазирование АРС на направление (θ_l, φ_l) ; $W_j^T = \exp\{ik(\theta_l, \varphi_l) r_j\}$; $W_{\text{APC}} = \begin{Bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{Bmatrix}$ — вектор-столбец весовых коэффициентов в системе сложения напряжений с нагрузок ортогональных диполей антенных элементов; r_j — радиус-вектор антенного элемента АРС; $L = \begin{pmatrix} \cos \theta \cdot \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \cos \theta \cdot \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$ — матрица преобразования поля $\begin{pmatrix} E_\phi \\ E_\psi \end{pmatrix}$ в поле $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$, основанная на матрице преобразования при переходе от локального базиса (e_ϕ, e_ψ, e_ρ) к системе координат $\{X, Y, Z\}$ (рис. 3).

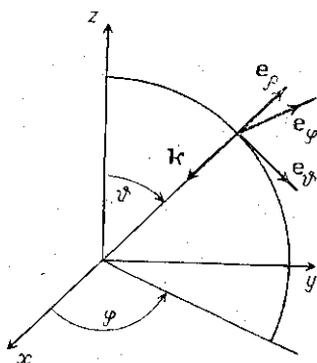


Рис. 3. Система координат X, Y, Z , связанная с ААР, и локальный базис, связанный с принимаемой волной

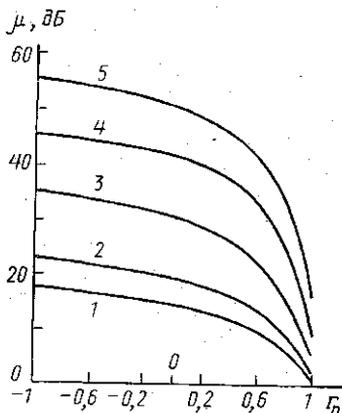


Рис. 4. Зависимость эффективности работы ААР с УПС от поляризации помехи: нормированная мощность аддитивного шума на входе ААР $\langle P_i \rangle = 1$ (1), 10^{-1} (2), 10^{-2} (3), 10^{-3} (4) и 10^{-4} (5)

Проанализируем роль поляризации волны в формировании диаграммы направленности АРС. Поляризацию будем характеризовать фазором поля E в локальном базисе (e_ϕ, e_ψ) :

$$P = E_\phi / E_\psi.$$

Используя определение фазора, действительной и комплексной амплитуды поля:

$$|E|^2 = |E_\phi|^2 + |E_\psi|^2, \quad E = |E| e^{i\Phi}, \quad \Phi = \arg E,$$

формуле (1) можно придать вид

$$U_{\text{APC}} = F_{\text{APC}} W_{\text{APC}}^T L \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix} E / [(1 + |P|^2)]^{1/2}. \quad (2)$$

Тогда выражение

$$\hat{F}_{\text{APC}} = F_{\text{APC}} W_{\text{APC}}^T L \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix} / [(1 + |P|^2)]^{1/2} \quad (3)$$

есть отклик АРС на единичную поляризованную волну с фазором P , идущую с направления (ϑ, φ) , т. е. ее пространственно-поляризационная диаграмма направленности, которая задана в пространстве четырех действительных переменных: $\vartheta, \varphi, \text{Re } P, \text{Im } P$.

Пространственно-поляризационную диаграмму направленности ОАР определим аналогично:

$$\widehat{F}_{\text{OAP}} = F_{\text{OAP}} \mathbf{W}_{\text{OAP}}^T \mathbf{L} \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix} / [(1 + |P|^2)]^{1/2}, \quad (4)$$

где $F_{\text{OAP}} = \sum_{q=1}^{16} W_q \exp\{ik(\vartheta, \varphi) r_q\}$; $\mathbf{W} = \{W_q\}$ — вектор весовых коэффициентов, управляемый адаптивным процессором, r_q — радиус-вектор антенного элемента ОАР, $\mathbf{W}_{\text{OAP}} = \begin{pmatrix} W_2^* \\ -W_1^* \end{pmatrix}$.

АРС и ОАР объединены в одно устройство — ААР с УПС — с помощью вектора комплексных весовых коэффициентов \mathbf{W} , сумматора и адаптивного процессора. Пространственно-поляризационная диаграмма направленности всей ААР равна сумме двух диаграмм:

$$\widehat{F}_{\text{AAR}}(\mathbf{W}, \vartheta, \varphi, P) = \widehat{F}_{\text{APC}}(\vartheta, \varphi, P) + \widehat{F}_{\text{OAP}}(\mathbf{W}, \vartheta, \varphi, P). \quad (5)$$

Отклик ААР с УПС на сумму M полей $E_m(\vartheta_m, \varphi_m, P_m)$ равен

$$U = \sum_{m=1}^M \widehat{F}_{\text{AAR}}(\mathbf{W}, \vartheta, \varphi, P) E_m(\vartheta_m, \varphi_m, P_m). \quad (6)$$

Пусть суперпозиция M полей составлена из поля одного полезного сигнала E_c и $M-1$ полей помех E_n . В настоящей модели ААР реализовано принципиальное условие:

$$\widehat{F}_{\text{OAP}}(\mathbf{W}, \vartheta_c, \varphi_c, P_c) E_c(\vartheta_c, \varphi_c, P_c) \equiv 0. \quad (7)$$

В этом случае из формул (5) и (6) следует, что отклик ААР с УПС на смесь одного сигнала и $M-1$ помехи равен

$$U = U_c + U_n(\mathbf{W}), \quad (8)$$

где

$$U_c = \widehat{F}_{\text{APC}} E_c \text{ — отклик АРС на полезный сигнал,} \quad U_n(\mathbf{W}) = \sum_{m=2}^M \widehat{F}_{\text{AAR}} E_m \text{ — отклик на } M-1 \text{ помеху.}$$

В соответствии с (7) среднее значение выходной мощности ААР с УПС равно

$$\langle |U|^2 \rangle = \langle |U_c|^2 \rangle + \langle U_c U_n^*(\mathbf{W}) \rangle + \langle |U_n(\mathbf{W})|^2 \rangle. \quad (9)$$

При взаимной некоррелированности сигнала и помех $\langle U_c U_n^* \rangle = 0$ и из (9) следует, что минимум средней выходной мощности ААР с УПС соответствует условию $\langle |U_n(\mathbf{W} = \mathbf{W}_{\text{opt}})|^2 \rangle = 0$. Следовательно, находя в процессе адаптации оптимальное значение вектора \mathbf{W}_{opt} , можно так изменить пространственно-поляризационную диаграмму направленности ААР, что в ее выходном отклике не будет помех. Разумеется, наличие шума и неточное выполнение условия (7) приводят к неполному подавлению помех, и средняя выходная мощность ААР с УПС будет лишь приблизительно равна мощности полезного сигнала.

Вектор весовых коэффициентов W_{opt} , обеспечивающий минимум выходной мощности ААР, можно найти с помощью адаптивного процессора, реализующего, например, метод наискорейшего градиентного спуска.

Обозначим отношение средней мощности полезного сигнала P_c к сумме средних мощностей помехи P_n и аддитивного шума P_f числом

$$\mu_1 = \langle P_c \rangle / (\langle P_n \rangle + \langle P_f \rangle).$$

Введем в рассмотрение отношение $\mu = \mu_2 / \mu_1$, где $\mu_{2,1} = \mu_i$ на выходе и входе ААР соответственно. Очевидно, что число μ характеризует качество (эффективность) подавления помехи данной ААР и является косвенной мерой точности найденного оптимального решения $W = W_{opt}$.

Эффективность работы ААР с УПС

Рассмотрим типичные и предельные (по значениям параметров задачи) случаи, которые могут иметь место при заданной конфигурации ААР с УПС, размещенной на борту геостационарного ИСЗ.

Основная задача любой антенной решетки — это улучшение отношения сигнал/(помеха+шум) на входе подключенного к ней радиоприемного устройства. Эффективность работы ААР будет равна единице, если все параметры полей сигнала и помехи, по которым их можно различать, совпадают. Для иллюстрации преимуществ ААР с УПС имеет смысл рассмотреть условия, при которых традиционные ААР с угловой селекцией не работают — случай совпадения углов прихода сигнала и помехи.

Для наглядности представления результатов исследований поляризацию электромагнитного поля будем определять не фазором $P = \text{Re } P + i \text{Im } P$, а двумя эквивалентными параметрами: отношением осей эллипса поляризации поля $\pm r$ (знаки \pm определяют направление вращения вектора E в плоскости волнового фронта) и углом β между большой осью эллипса поляризации и направлением e_0 в локальной системе координат.

Рассмотрим работу ААР с УПС при следующих условиях задачи.

1. Мощности сигнала и помехи на одном диполе антенного элемента равны ($P_c = P_n = 1$).

2. Поляризация сигнала в сопровождающей системе координат фиксированная — круговая с правым вращением вектора E_c ($r_c = 1$).

3. Поляризация помехи в сопровождающей системе координат произвольная ($-1 < r_n < 1$; $\beta_n = 0^\circ \div 360^\circ$).

4. Углы прихода сигнала в системе координат, связанной с ИСЗ, фиксированы: $\theta_c = \varphi_c = 0$ (источник сигнала находится в центре лепестка диаграммы направленности АРС с номером $l=0$).

5. Углы прихода помехи в системе координат, связанной с ИСЗ, принимают значения в пределах $0 < |\theta_n| < 12^\circ$, $0 < \varphi_n < 360^\circ$.

6. Мощность аддитивного шума на диполе одного антенного элемента $\langle P_f \rangle$ — переменный параметр ($1 < \langle P_f \rangle < 10^{-4}$); шум — нормальный некоррелированный во времени и пространстве с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

7. Сигнал, помеха и шум взаимно некоррелированы.

8. Сигнал и помеха полностью поляризованы.

На рис. 4 представлены результаты вычислений эффективности работы ААР с УПС в наихудшем случае — при совпадении углов при-

хода сигнала и помехи. Анализ представленных графиков позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Эффективность работы ААР с УПС даже при совпадении углов прихода сигнала и помехи, но при различии их поляризации оценивается десятками децибел ($\sim 5 \div 50$ дБ).

2. Зависимость эффективности $\mu = f(r_n)$ нелинейна и величина μ резко уменьшается по мере сближения поляризации помехи и сигнала, но и при $r_n = 0,99$ и $r_c = 1$ эффективность работы ААР с УПС остается высокой ($\mu \approx 5 \div 20$ дБ в зависимости от $\langle P_f \rangle$).

Результаты исследований качества работы ААР с УПС при различных углах прихода помехи представлены на рис. 5 при $\vartheta_c = \varphi_c = \varphi_n = 0$, $\beta_n = 0$ и $\langle P_f \rangle = 10^{-4}$.

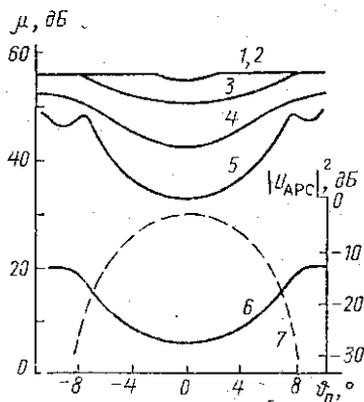


Рис. 5. Зависимость эффективности работы ААР с УПС от угла прихода помехи: поляризации помехи $r_p = -1$ (1); $-0,5$ (2); 0 (3); $0,5$ (4); $0,8$ (5) и $0,99$ (6); кривая 7 — главный лепесток диаграммы направленности АРС

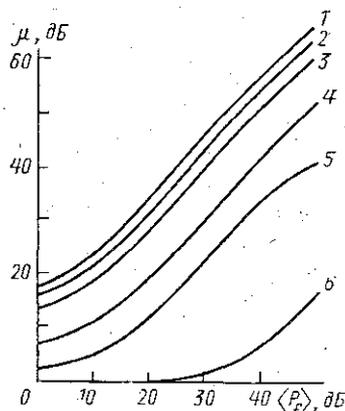


Рис. 6. Зависимость эффективности работы ААР с УПС от мощности аддитивного шума $\langle P_f \rangle$ на входе решетки: поляризация помехи $r_p = -1$ (1); $-0,5$ (2); 0 (3); $0,5$ (4); $0,8$ (5) и $0,99$ (6)

Полученные графики позволяют заключить, что эффективность работы ААР с УПС слабо зависит от угла прихода помехи, находящейся в пределах зоны обслуживания ИСЗ, в широком диапазоне значений величины $\Delta r = |r_c - r_n|$ ($40 \text{ дБ} \leq \mu \leq 55 \text{ дБ}$); исключение составляет область близких значений r_n и r_c : при $r_n = 0,99 r_c$ и при вариации угла прихода помехи $\vartheta_n = \pm 8^\circ$ функция $\mu = f(\vartheta_n)$ варьируется в пределах $6 \div 20$ дБ, причем значение μ остается больше 6 дБ даже при совпадении углов прихода сигнала и помехи.

Эффективность работы ААР с УПС зависит также от относительного уровня аддитивного шума. На рис. 6 представлено семейство графиков функции $\mu = f(\langle P_f \rangle)$ при $\vartheta_n = 0$ и $r_n = -1$; $-0,5$; 0 ; $0,5$; $0,8$ и $0,99$ (кривые 1—6 соответственно), которые свидетельствуют о том, что

1) эффективность работы ААР с УПС зависит от величины аддитивного шума нелинейно, особенно при близости параметра r сигнала и помехи;

2) работа ААР с УПС остается эффективной ($\mu > 6$ дБ) даже в очень неблагоприятных условиях, когда отношение сигнал/шум равно 1 и углы прихода сигнала и помехи совпадают; и единственное условие для достижения этого результата — это некоторое различие поляризации сигнала и помехи ($|r_c - r_n| \sim 0,01$).

Представленные результаты достаточно полно характеризуют возможности селекции электромагнитных полей одной частоты с помощью

особой разновидности ААР, диаграмма направленности которой определена в пространстве углов и поляризации. Селективные возможности ААР с УПС намного превосходят аналогичные возможности традиционных ААР с угловой селекцией.

Заключение

Пространственно-поляризационная обработка многолучевых электромагнитных полей открывает новые возможности при создании различных устройств приема и передачи радиосигналов.

В настоящей работе предложена оригинальная структура и исследована модель одного из таких устройств — адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией; заложенные в нее принципы построения универсальны и могут быть применены при разработке устройств радиоприема, предназначенных для работы в космическом, тропосферном и ионосферном каналах связи.

В результате исследований получены количественные оценки выигрыша в отношении сигнал/(помеха+шум), которые обеспечивает ААР с УПС, работающая на борту геостационарного ИСЗ в различных условиях радиосвязи. Важной особенностью ААР с УПС является то, что она принимает полезный сигнал даже в том случае, когда углы прихода сигнала и помехи совпадают.

Способность ААР с УПС принимать сигнал, идущий с того же направления, что и помеха, сохраняется и для очень слабых сигналов, когда в канале связи отношения сигнал/шум и сигнал/помехи равны 1. Даже в этих крайне неблагоприятных условиях радиосвязи ААР с УПС обеспечивает выигрыш в отношении сигнал/(помехи+шум) примерно в 3÷18 дБ, т. е. гарантирует надежный прием полезного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М., 1989.
- [2] Березин Ю. В., Талицкий А. И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1981. 22, № 2. С. 12.
- [3] Compton R. T., Jr. // IEEE Trans. Antennas Propag. 1981. AP-29, N 5. P. 718.
- [4] Корниенко Л. Г., Колос Ю. А. // Антенны. 1989. № 36. С. 12.
- [5] Нгуен Тан Динь, Нгуен Зи Линь. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1980. 23, № 9. С. 90.