

Ильницкий Л.Я., д-р техн. наук
Сибрук Л.В., д-р техн. наук
Щербина О. А., канд. техн. наук
Осама Тураби

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА СИГНАЛА ПОМЕХИ ДВОЭЛЕМЕНТНОЙ АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ

Институт электроники и систем управления
Национального авиационного университета

Рассмотрены погрешности измерения направления прихода помехового сигнала для малоэлементной антенной решётки, произведена оценка минимального угла разнесения источников сигнала и помехи

Введение

В работе [1] показано, что с помощью адаптивной антенной решётки, состоящей из двух ненаправленных элементов, можно не только подавлять помеховый сигнал, но и определять направление его прихода. Известно [2], что антенна, в которой используется исключение помехового сигнала в выходном напряжении за счёт сравнительно простой обработки, не может эффективно работать при небольших угловых разнесениях между источниками сигнала и помехи. Но тем не менее, простота устройства обработки сигналов и возможность получать дополнительную информацию о местоположении источника сигнала делают такую антенную решётку перспективной. Применение таких антенных решёток для целей радиомониторинга и радиоконтроля может быть обеспечено при условии, что будут найдены ответы на два основных вопроса: какое минимальное разнесение источников сигнала и помехи позволяет избавиться от напряжения помехи, и какая погрешность определения направления на источник помехи.

Постановка задачи

Поскольку принципы действия антенны изложены в работе [1], то необходимо рассмотреть прежде всего как изменится отношение сигнал/помеха в зависимости от угла направления прихода помеховой волны θ .

Кроме того следует определить минимальное значение (θ_{\min}) исходя из реально допустимых изменений управляющих напряжений в устройстве, т. е. оценить θ_{\min} при максимально допустимых значениях напряжений, которые вырабатываются процессором. И наконец, используя выведенные в предыдущей статье аналитические выражения, определить зависимость точности измерения угла θ от стабильности параметров антенной решётки и функциональных узлов структуры обработки сигналов. Очевидно, что в описании принципа действия антенной решётки все необходимые исходные величины входят в различные аналитические соотношения и представляют собой основу для выяснения проблемных вопросов.

Оценка отношения сигнал/шум

Структурная схема двоэлементной антенной решётки приведена на рис. 1. Слабонаправленные излучатели А1 и А2 присоединены ко входам преобразователей частоты ПЧ1 и ПЧ2, к которым подводится гармоническое напряжение от одного гетеродина (Гет). Преобразованные по частоте напряжения поступают на идентичные усилители промежуточной частоты УПЧ1 и УПЧ2. Цепи обработки сигналов на промежуточной частоте включают в себя суммирующее и вычитающее устройство СВУ1, перемножите-

ли ПМ1, ПМ2, ПМ3, фазосдвигающий узел, обеспечивающий сдвиг фаз на $-\pi/2$, интеграторы (Инт1 и Инт2) и вычитающее устройство (ВУ). На вход про-

цессора поступают усреднённые за период напряжения U_{12} и U_{13} , а также напряжение с выхода детектора Д.

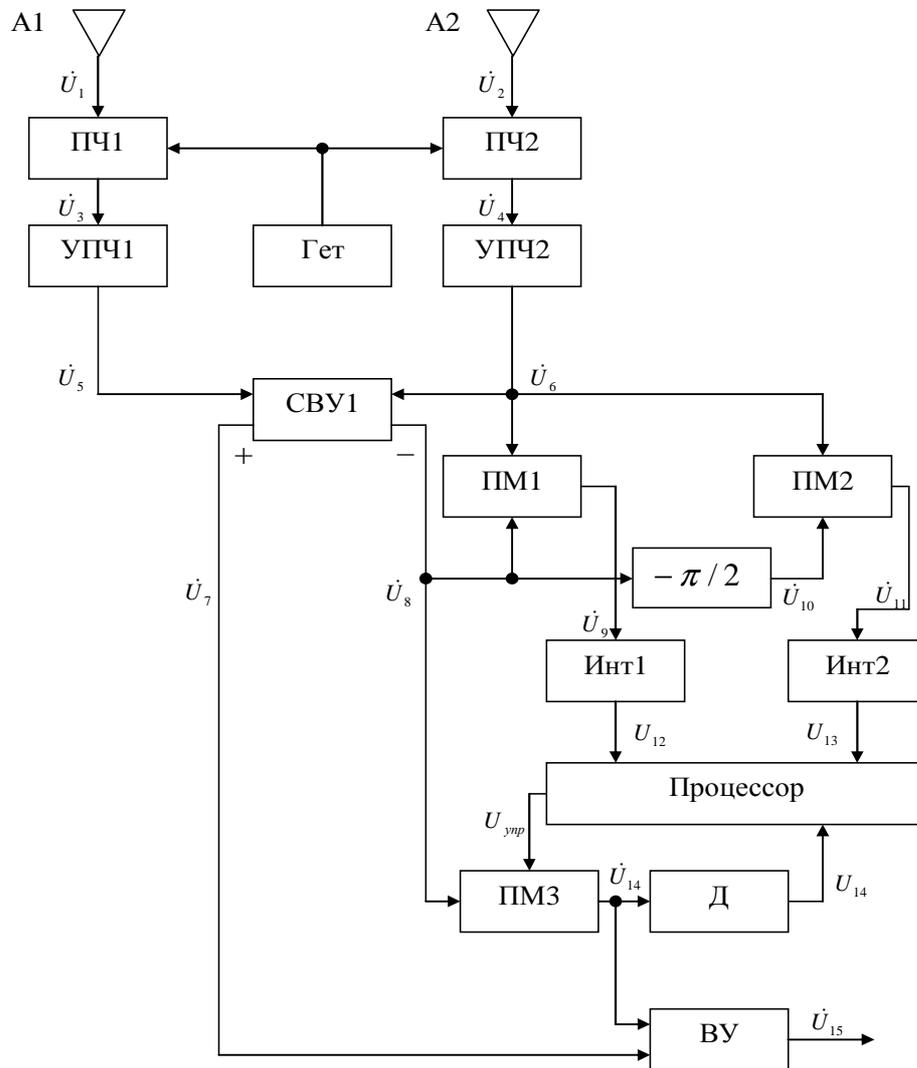


Рис. 1. Структурная схема малоэлементной антенной решётки

Слабонаправленные излучатели А1 и А2 присоединены ко входам преобразователей частоты ПЧ1 и ПЧ2, к которым подводится гармоническое напряжение от одного гетеродина (Гет). Преобразованные по частоте напряжения поступают на идентичные усилители промежуточной частоты УПЧ1 и УПЧ2. Цепи обработки сигналов на промежуточной частоте включают в себя суммирующее и вычитающее устройство СВУ1, перемножители ПМ1, ПМ2, ПМ3, фазосдвигающий узел, обеспечивающий сдвиг фаз на $-\pi/2$, интеграторы (Инт1 и Инт2) и вы-

читающее устройство (ВУ). На вход процессора поступают усреднённые за период напряжения U_{12} и U_{13} , а также напряжение с выхода детектора Д.

На схеме показаны напряжения в соответствующих точках системы обработки сигналов. Выходное напряжение \dot{U}_{15} несёт нужную для контроля информацию, т. е. \dot{U}_{15} представляет собой полезный сигнал \dot{U}_C . Сигналы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 содержат смесь сигнала и помехи ($\dot{U}_П$). Отношение амплитуд этих двух сигналов определяется как

$$\gamma = \frac{U_c}{U_{II}}. \quad (1)$$

Из принципа действия устройства следует, что на выходе

$$\dot{U}_C = \frac{\dot{U}_7 - \dot{U}_{14}}{2A} = \frac{\dot{U}_{15}}{2A}, \quad (2)$$

где A – некоторая постоянная, определяемая коэффициентами передачи узлов схемы обработки сигналов.

В цепях обратной связи сравнивается напряжение U_{14} с опорным напряжением U_0 и по величине рассогласования этих напряжений ε вырабатывается управляющее напряжение U_{ynp} , которое изменяет коэффициент передачи блока ПМЗ. Как было показано в предыдущей статье, напряжение \dot{U}_{14} определяется как

$$\dot{U}_{14} = 2A\dot{U}_{II}\cos\psi + |\varepsilon| = \dot{U}_0 + |\varepsilon|. \quad (3)$$

Учитывая, что

$$\dot{U}_7 = 2A(\dot{U}_C + \dot{U}_{II}\cos\psi),$$

находим отношение сигнал/помеха на выходе устройства обработки сигналов

$$\gamma^* \leq \left| \frac{\dot{U}_{15}}{U_0 - U_{14}} \right| = 2A \frac{U_c}{|\varepsilon|}. \quad (4)$$

Очевидно, что процессор может обеспечить значение рассогласования ε порядка 0,01 и даже меньше. Поэтому отношение сигнал/помеха на выходе устройства обработки сигналов возрастает на несколько порядков.

Оценка минимального угла разнесения источников сигнала и помехи

Для оценки минимального угла разнесения источников сигнала и помехи используем связь между управляющим напряжением U_{ynp} , которое формируется в процессоре, и фазовым сдвигом между составляющими помехового сигнала ψ . Из принципа действия антенны следует, что

$$U_{ynp} = b \operatorname{ctg} \psi, \quad (5)$$

где b – постоянный коэффициент, имеющий размерность в вольтах.

Учитывая, что ψ определяется разностью хода лучей к элементам антенной решётки

$$\psi = \frac{kd}{2} \sin \theta, \quad (6)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, d – расстояние между элементами решётки, находим

$$U_{ynp} = b \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) \quad (7)$$

или

$$\theta = \arcsin \left[\frac{\lambda}{\pi d} \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{ynp}}{b} \right) \right]. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) дают возможность определить θ_{\min} . Минимальный угол разнесения источников сигнала и помехи зависит от расстояния между элементами решётки d/λ и максимально возможного значения отношения управляющего напряжения к коэффициенту b . По формуле (7) построен график (рис. 2), который позволяет без вычислений определить сектор, в котором помеховый сигнал подавить с помощью анализируемой антенной системы невозможно.

Погрешности измерения направления прихода помехового сигнала

Исходя из приведённой схемы, видно, что направление прихода электромагнитной волны определяется по формуле

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda \psi}{\pi d} = \arcsin \left[\frac{\lambda}{\pi d} \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{12}}{U_{13}} \right) \right]. \quad (9)$$

Очевидно, что угловая погрешность будет иметь такое значение

$$\Delta\theta = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} \left(\frac{\partial v}{\partial U_{12}} \Delta U_{12} + \frac{\partial v}{\partial U_{13}} \Delta U_{13} + \frac{\partial v}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial v}{\partial d} \Delta d \right), \quad (10)$$

где $v = \left[\frac{\lambda}{\pi d} \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{12}}{U_{13}} \right) \right]$, ΔU_{12} , ΔU_{13} , $\Delta \lambda$, Δd – погрешности измерения соответствующих величин.

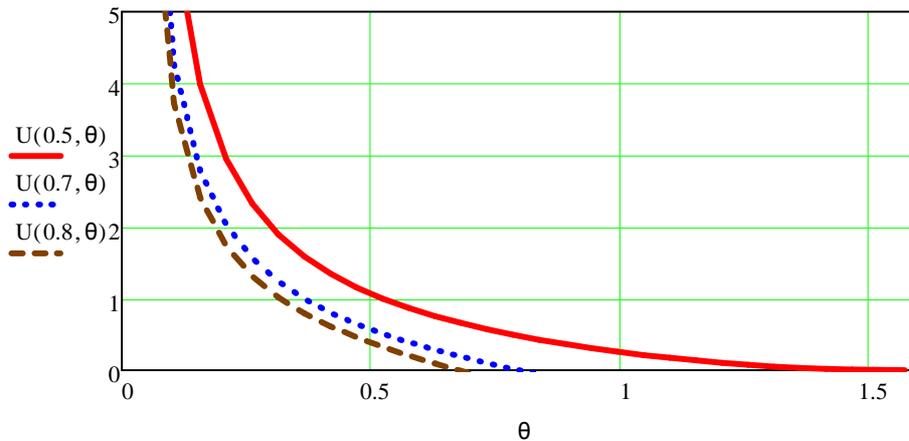


Рис. 2. График зависимости управляющего напряжения от угла прихода помеховой электромагнитной волны при фиксированном относительном расстоянии между элементами антенной решётки ($d/\lambda = 0.5; 0.7; 0.8$)

Частные производные по своей сути являются коэффициентами влияния. Их значения равны

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial U_{12}} &= \frac{\lambda}{\pi d} \frac{U_{13}^2}{U_{12}^2 + U_{13}^2} \frac{U_{12}}{U_{13}} \frac{1}{U_{12}}; \\ \frac{\partial v}{\partial U_{13}} &= \frac{\lambda}{\pi d} \frac{U_{13}^2}{U_{12}^2 + U_{13}^2} \frac{U_{12}}{U_{13}} \frac{1}{U_{13}}; \\ \frac{\partial v}{\partial \lambda} &= v \frac{1}{\lambda}; \\ \frac{\partial v}{\partial d} &= v \frac{1}{d}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Значение ошибок ΔU_{12} и ΔU_{13} можно найти из способа формирования напряжений U_{12} и U_{13} . Из рис. 1 следует, что U_{12} представляет собой усреднённое значение произведения напряжений \dot{U}_6 и \dot{U}_8 , или

$$U_{12} = K_i \int_0^T M [\dot{U}_5(t) \dot{U}_6(t) - \dot{U}_6^2(t)] dt, (12)$$

где K_i – коэффициент передачи интегратора, M – коэффициент передачи множителя.

Напряжения \dot{U}_5 и \dot{U}_6 содержат по крайней мере два гармонический процес-

са, один из которых относится к полезному сигналу, второй – к помехе. Поэтому, пренебрегая малыми величинами второго порядка, можем записать

$$\Delta U_{12} = K_i M \left\{ \begin{aligned} & \overline{[\dot{U}_5(t) \Delta \dot{U}_6(t) +} \\ & - \dot{U}_6(t) \Delta \dot{U}_5(t)]} \\ & - 2 \overline{[\dot{U}_6(t) \Delta \dot{U}_6(t)]} \end{aligned} \right\}, (13)$$

где черта над выражениями в фигурных скобках обозначает усреднение.

Такое же значение имеет ошибка ΔU_{13} . Различие заключается лишь в том, что при формировании сигнала \dot{U}_{13} возможно появление погрешности, которая обусловлена неточностью установки фазового сдвига $-\pi/2$ в фазовращающем узле. Если пренебречь этой ошибкой, то можно принять

$$\Delta U_{13} \approx \Delta U_{12}. (14)$$

Установку частоты, а соответственно, длины волны можно выполнить с высокой точностью. Точно также погрешность определения расстояния между элементами d может быть сделана пренебрежительно малой. Эти предпосылки позволяют существенно упростить формулу (10)

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{\pi d \sqrt{1 - \left[\frac{\lambda}{\pi d} \operatorname{arctg} \frac{U_{12}}{U_{13}} \right]^2}} \times \times \frac{U_{13}^2}{U_{12}^2 + U_{13}^2} \frac{U_{12}}{U_{13}} \delta U_{12}, \quad (15)$$

Значение погрешности $\Delta\theta$ меняется в зависимости от соотношений d/λ и $\frac{U_{12}}{U_{13}}$. Эти зависимости отображены с помощью графиков (рис. 3 - 5), построенных с помощью формулы (15).

где δU_{12} – относительная погрешность измерения напряжения U_{12} .

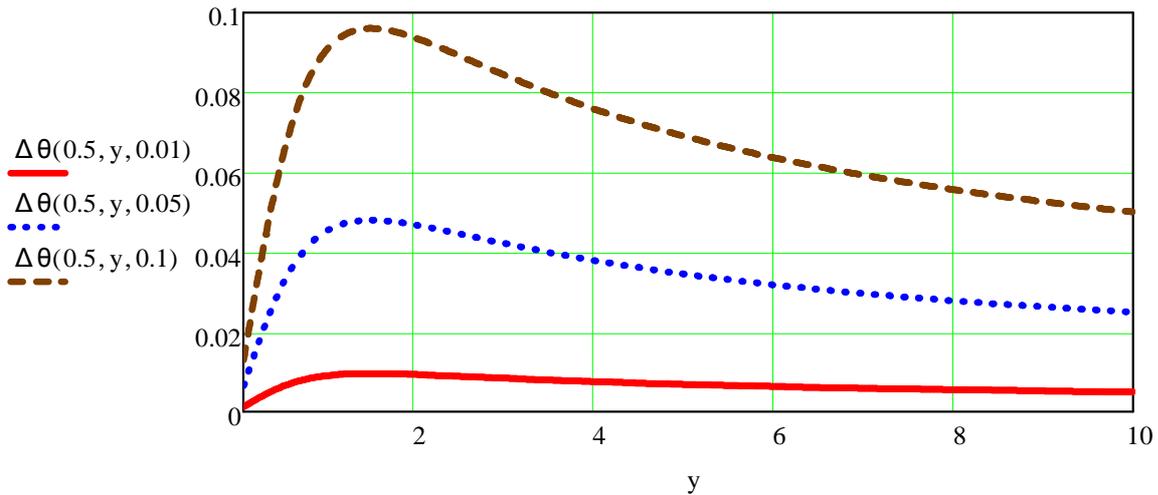


Рис. 3. График зависимости угловой погрешности измерения направления прихода помехового сигнала от отношения $U_{12}/U_{13} = y$ при фиксированных значениях относительного расстояния между элементами антенной решётки $d/\lambda = 0.5$ и относительной погрешности измерения напряжения U_{12} : $\delta U_{12} = 0.01; 0.05; 0.1$.

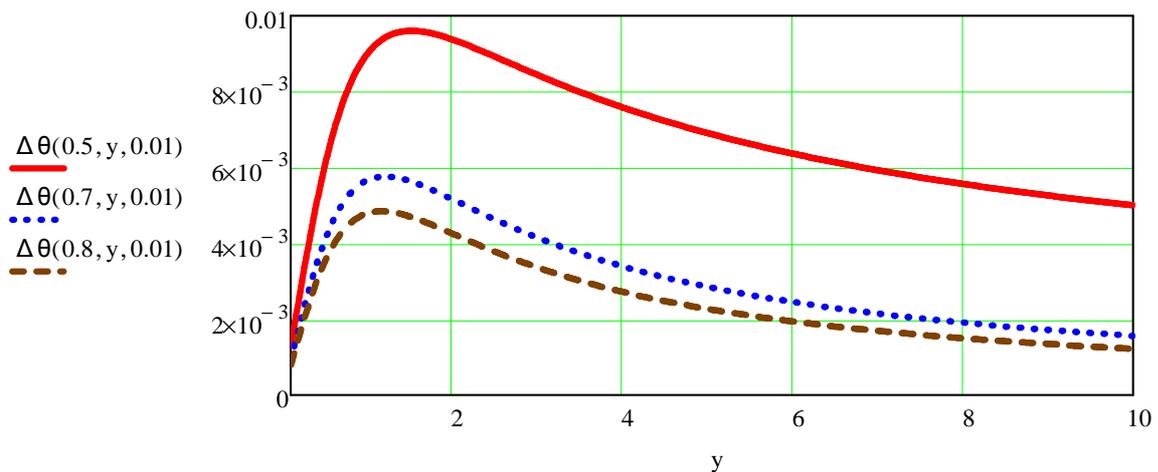


Рис. 4. График зависимости угловой погрешности измерения направления прихода помехового сигнала от отношения $U_{12}/U_{13} = y$ при фиксированных значениях относительного расстояния между элементами антенной решётки $d/\lambda = 0.5; 0.7; 0.8$ и относительной погрешности измерения напряжения U_{12} : $\delta U_{12} = 0.01$.

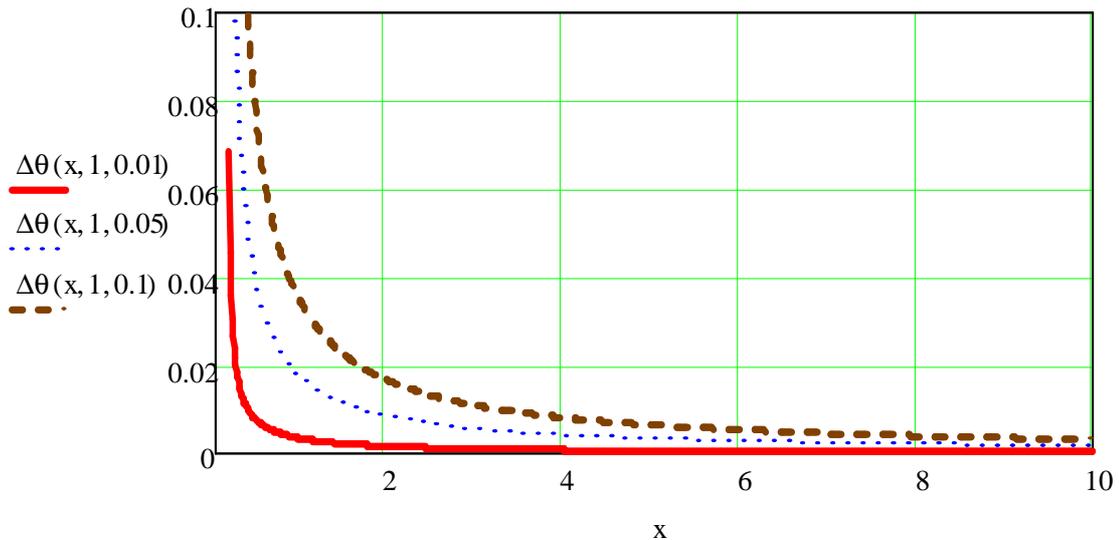


Рис. 5. График зависимости угловой погрешности измерения направления прихода помехового сигнала от относительного расстояния между элементами антенной решётки $d / \lambda = x$ при фиксированных значениях отношения $\frac{U_{12}}{U_{13}} = 1$ и относительной погрешности измерения напряжения $U_{12} : \delta U_{12} = 0.01; 0.05; 0.1$.

Выводы

Из анализов процессов функционирования двоэлементной антенны следует:

- антенная решётка позволяет увеличить отношение сигнал/помеха даже при одинаковых частотах как сигнала, так и помехи на несколько порядков;

- значение минимального угла разнесения между источниками сигнала и помехи зависит от возможных максимальных значений управляющих напряжений и относительного расстояния между элементами решётки d / λ . Причём зависимость θ_{\min} от d / λ слабая, что позволяет ориентироваться при реализации устройства обработки сигналов лишь на максимально возможное значение $U_{\text{упр}}$;

- погрешности определения угла θ , под которым приходит помеха, в значительной мере зависит от погрешностей измерения напряжённостей поля (напряжений на выходах антенн);

- уменьшение погрешности $\Delta\theta$ можно достичь увеличением расстояния между элементами антенны. Наиболее резко снижается погрешность $\Delta\theta$ при больших расстояниях ($d / \lambda > 1$);

- максимальная погрешность $\Delta\theta$ наблюдается при одинаковых значениях напряжений U_{12} и U_{13} .

Список литературы

1. Ильницький Л.Я., Сибрук Л.В., Осама Тураби. Малоэлементная антенная решётка с подавлением помехи на частоте сигнала. // Матеріали VII МНТК "Авіа-2006". – Т. 1. – К.: НАУ. – 2006. – С. 57–61.
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.