УДК 621.391

ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ДАЛЬНОСТИ ДО ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ ДЛЯ ВЫБОРА МАКСИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Цуканов О.Ф., Якорнов Е.А.

Институт телекоммуникационных систем НТУУ «КПИ»

E-mail:yakornov@its.kpi.ua

Dispersion range evaluation towards the radio source based on the results of phase shifts' measurements for selecting the maximum number of elements in antenna lattice

The maximum possible number of elements in the linear array antenna has been determined based on error dispersion estimation in determining the distance to the radio source, located in the Fresnel zone. At the same time the disambiguation problem of phase shifts measuring on the curvature of electromagnetic wave front has been solved in order to define the Fresnel contours.

В работе [1] рассматривается решение задачи определения местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) при его нахождении в зоне Френеля по кривизне фронта электромагнитной волны (ЭМВ), принимаемой разреженной линейной антенной решеткой (АР), с помощью еще не нашедшего должного применения нового информационного параметра разности разностей фаз ($\Delta\Delta\psi$) между тремя разнесенными приемными антеннами решетки в предположении того, что фронт принимаемой ЭМВ является сферическим. В частности, показано, что этот параметр связан с дальностью до ИРИ. Однако применение систем на основе $\Delta\Delta\psi$ ограничено имеющейся неоднозначностью фазовых отчетов (когда $\Delta\Delta\psi$ становится больше 720^0).

Основываясь на подходе к устранению неоднозначности при оценке углового направления θ ИРИ по плоскому фронту ЭМВ, изложенному в [2], проанализируем возможности устранения неоднозначности для эквидистантой линейной АР, состоящей из $M+1$ приемных элементов (рис.1), которые находятся друг от друга на расстоянии половины средней длины волны $\lambda/2$ рабочего диапазона системы с АР в случае определения дальности R до ИРИ по кривизне фронта ЭМВ.

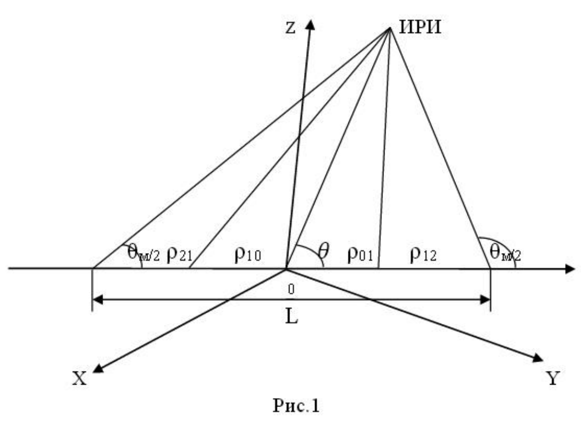

Рис.1

Однозначное измерение фазы сигнала ИРИ возможно когда минимальная длина АР $L=\lambda$. Если $L>>\lambda$, то однозначное измерения возможно, если расстояние между элементами разреженной АР $\rho_{M0..}$, ρ_{10}, ρ_{01}, ρ_{02},...ρ_{0M} равно $\lambda/2$, при общем количестве антенн M+1. Нумерация элементов АР начинается с антенны расположенной точке 0 рис.1, а измерения углового направления θ и R производятся относительно центрального элемента решетки.

Чтобы при нумерации антенн избежать отрицательного номера, введем квадратичную нумерацию i^2 =1,4..(M/2-1)^2,(M/2)^2. Таким образом, сигнал принятый каждым элементом АР будет усиливаться в i^2 раз, усиление будет максимальным в крайних элементах и квадратично уменьшаться до единицы в центральном элементе, то есть получаем некую АР со "сферической апертурой" для определения R по результатам измерениям фазовых сдвигов ($\Delta\psi$) ЭМВ со сферическим фронтом. Одновременно полагаем, что АР имеет "линейную" апертуру, а фронт ЭМВ плоским, тогда задача определения $\Delta\psi$ по сферическому фронту волны приводится к известной задаче однозначного определения $\Delta\psi$ между элементами АР, только для измерения дальности до ИРИ.

Сигналом ИРИ $Y(R)$ являются значения набегов фаз ψ_i , i - ых элементов разреженной АР при известной, предварительно измеренной угловой координате θ.

$$Y(R)= \frac{2\pi}{\lambda}\frac{L^2 \sin^2\theta}{2R} + n(R), \tag{1}$$

где $n(R)$ - случайные флюктуации фазы.

В качестве оцениваемой величины берем параметр $\alpha=1/R$, называемый кривизной фазового фронта [2], тогда

$$Y(L, \alpha) = G\cdot\alpha\cdot L^2 + n(\alpha), \tag{2}$$

где $k = \frac{2\cdot\pi}{\lambda}$, $G = k\cdot \sin^2\theta/2;$

После дискретизации, запишем (2) в виде

$$\bar{Y}(L, \alpha)= \bar{X}(L, \alpha)+ \bar{n}(\alpha),$$

где $\bar{X}(L,\alpha)$- вектор ожидаемой реализации фазы в раскрыве АР.

Используя методику нахождения оценок по методу максимума правдоподобия для сигнала с полностью известными, кроме измеряемого параметра получаем:

$$\ln [\bar{Y}(L, \alpha)] = \bar{Y}(L,\alpha)^T \Phi^{-1} \bar{X}(L, \alpha) - 0.5\bar{X}(L, \alpha)^T \Phi^{-1}\bar{X}(L,\alpha), \tag{3}$$

где Φ^{-1}- обратная корреляционная матрица фазовых флюктуаций сигнала.

Максимально правдоподобная оценка $\hat{\alpha}$ соответствует выражению

$$\hat{\alpha} = \bar{X}(L,\alpha)^T\Phi^{-1}X(L,\alpha))\,)^{-1}Y(L,\alpha)^T\Phi^{-1}X\,(L,\alpha) \tag{4}$$

где $X(L,\alpha)^T = G\cdot\cdot L^2/M^2||(M/2)^2\ (M/2-1)^2 .....2\ 1\ 0\ 1\ 2 .....(M/2-1)^2\ (M/2)^2||$.

Полагая, что $\bar{X}(L,\alpha)^T\bar{X}(L,\alpha) = \frac{2G^2L^4}{M^4}\sum_{i=1}^{\frac{M}{2}} i^4$, а

$$\bar{Y}(L,\alpha)^T\bar{X}(L,\alpha) = 2\,G^2\,L\sum_{i=1}^{\frac{M}{2}} i^2(\psi_i - \psi_{i-1})/M^2,$$

и с учетом [3] получим

$\bar{X}(L,\alpha)$ = 4 G^2L^4[(1/30)[(M/2)(M/2+1)(M+1)(3$(M/2)^2$+3(M/2)-1)]/M^4.

$Y\ (L,\alpha)^T X(L,\alpha)$ = 2G^2 L $\sum_{i=1}^{M/2} i^2(\psi_i\ -\psi_{i-1})$/$M^2$.

Обозначим, $\Delta\psi_i = \psi_i$ - ψ_{i-1} тогда

$$\hat{\alpha} = \frac{15M^2\sum_{i=1}^{M/2} i^2\Delta\psi_i}{G^2L\,(M/2)(M/2+1)(M+1)(\left(\frac{M}{2}\right)^2+3(M/2)-1)} \qquad (5)$$

Оценим значение σR^2 – дисперсию ошибки оценки дальности $\hat{R}$ = 1/$\hat{\alpha}$.

$$\sigma R^2 = \pi L^2\ [\left(\frac{2\lambda\sin 2\theta}{\Delta\psi}\right)^2 \sigma\theta^2 + (\frac{sin^2\theta}{\Delta\psi})^2\sigma\lambda^2 + (\frac{\lambda sin^2\theta}{\Delta\psi^2})^2\sigma\Delta\psi^2], \qquad (6)$$

где: L= (M+1) λ/2, σR^2 - дисперсия ошибки измерения дальности, $\sigma\theta^2$, $\sigma\lambda^2$, $\sigma\Delta\psi^2$ - дисперсия ошибки измерения θ, λ, $\Delta\psi$ - соответственно.

Величины $\sigma\theta^2$, σf^2, $\sigma\Delta\psi^2$ определяются техническими характеристиками устройств измерения параметров θ, λ, $\Delta\psi$. Значение $\sigma\theta^2$ определяет квадрат ошибки измерения углового направления θ, $\sigma\lambda^2$ - квадрату ошибки измерения длины волны ИРИ, а $\sigma\Delta\psi^2$ определяется квадратом ошибки измерения фазового сдвига $\Delta\psi$.

Ввиду малого значения первого и второго слагаемого ими можно пренебречь. Значение σR^2 определяется длиной АР L и погрешностью измерения $\Delta\psi$. Итак чем больше L, тем больше дисперсия ошибки измерения дальности σR^2, причем эта зависимость квадратичная.

n	M+1	σR^2 [$м^2$]
1	5	0.36
2	6	0.49
3	9	1.2
4	12	1.7
5	15	2.6

Выражение (6) позволяет сделать вывод о конфигурации АР. Зависимость σR^2 от количества элементов АР М для λ=1м. приведены в таблице. Анализ таблицы показывает: чтобы значение дисперсии σR^2 не превышало 1$м^2$ максимальное число приемных элементов АР не должно превышать 9.

В этом случае можно также достичь максимальной дальности измерения (увеличения границы зоны Френеля) при минимальной дисперсии ошибки.

Литература

1. Авдеенко Г.Л., Федоров В.И., Якорнов Е.А. Определение местоположения источника радио излучения по кривизне фронта электромагнитной волны. Известия вузов. Радиоэлектроника. - 2008. № 3. – с. 3-11.
2. Патент № 2322681 (Россия) Способ определения дальности до забрасываемого передатчика помех и устройство для его реализации. М. кл. G01S 3/00 // Боровиков С.Г., Ястребов Ю.В.
3. Интегралы и ряды. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. - М.: Наука, 1981, с.597.