

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЕ С КОНИЧЕСКОЙ РАЗВЕРТКОЙ ЛУЧА

А.Т. Зелененко
ФГУП НИИ «Градиент»

С.В. Землянский, В.В. Шацкий
Ростовский военный институт ракетных войск

С.Е. Мищенко
Ростовская академия сервиса ЮРГУЭС, mihome@yandex.ru

Предложен метод энергетической оптимизации сигналов в каналах зеркальной антенны с конической разверткой луча. Рассмотрен вариант реализации метода, подтверждающий его эффективность.

В условиях непрерывно меняющейся обстановки, особенно при воздействии преднамеренных помех, резко возрастают требования к каналам обработки принимаемой информации. В последние годы для повышения помехозащищенности приемных систем стали шире использовать возможности антенных решеток [1,2]. Однако большинство систем радиолокации и связи снабжены зеркальными антеннами, в которых используется коническая развертка луча. Непрерывное сканирование луча достигается механическим вращением облучателя, смещенного относительно фокуса. Подобная конструкция обеспечивает создание последовательно во времени четырех измерительных каналов на основе одноканальной системы и позволяет оценить уходы цели из равносигнального направления.

Создание конической развертки луча возможно и в многоэлементных антеннах, реализующих параллельную обработку сигналов. Однако в одноканальных антеннах или антенных системах, использующих малое число каналов, при воздействии мощных источников взаимных или преднамеренных помех, наиболее сложно обеспечить необходимую помехоустойчивость измерительной системы координат. С учётом сказанного, повышение помехоустойчивости в каналах обработки информации зеркальной антенны системы измерения координат является актуальной научной и практической задачей.

Цель статьи состоит в разработке метода энергетической оптимизации в зеркальной антенне с конической разверткой луча и направлений его реализации.

Рассмотрим математическую модель зеркальной антенны со смещенным из фокуса облучателем.

Спадающее амплитудное распределение, создаваемое облучателем зеркальной антенны, размещенным в ее фокусе, на поверхности раскрытия может быть рассчитано по формуле [3, с. 193-208]:

$$A(\gamma, \psi) = |F_0(\gamma, \psi)| r^{-1} f, \quad (1)$$

где

$$r = 2f(1 + \cos \gamma)^{-1}; \quad (2)$$

f – фокусное расстояние зеркала; $F_0(\gamma, \psi)$ – диаграмма направленности (ДН) облучателя зеркала. Геометрия зеркала приведена на рис. 1.

При смещении облучателя из фокуса амплитудное распределение также изменяется. Это смещение является несущественным, если размеры раскрытия значительно превышают расстояние, на которое смещен облучатель.

Более важным с точки зрения формирования ДН зеркальной антенны со смещенным из фокуса облучателем является фазовое распределение в раскрытии $\xi(\gamma, \psi)$, которое может быть определено например с помощью методов геометрической оптики.

С учётом сказанного, ДН зеркальной антенны со смещенным облучателем может быть определена по формуле:

$$F(\theta, \varphi, \psi_0) = \int_{-\tilde{A}}^{\tilde{A}} \int_0^{2\pi} A(\gamma, \psi) \exp(ik\xi(\gamma, \psi, \psi_0)) \exp(ik(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)) \sin \gamma d\gamma d\psi, \quad (3)$$

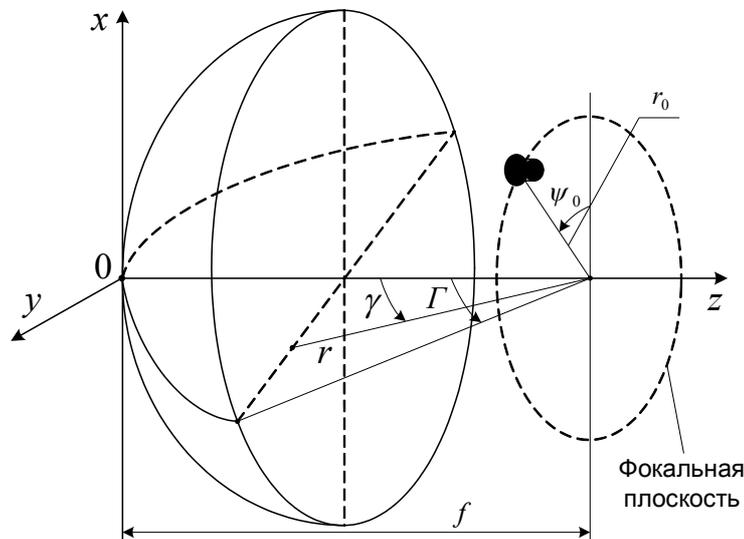


Рис.1

где

$$\xi(\gamma, \psi) = \sqrt{(x - r_0 \cos \psi_0)^2 + (y - r_0 \sin \psi_0)^2 + (z - f)^2} - z; \quad (4)$$

$x = \sin \gamma \cos \psi$; $y = \sin \gamma \sin \psi$; $z = 0,25f(x^2 + y^2)$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $2\tilde{A}$ – угловые размеры зеркала; r_0 – смещение облучателя относительно фокуса в фокальной плоскости; ψ_0 – угол поворота облучателя в фокальной плоскости вокруг оси Oz (рис. 1).

В измерительной системе с конической разверткой луча для формирования четырех измерительных каналов необходимо последовательно изменять координату ψ_0 в интервалах:

$\psi_0 \in (270^\circ, 90^\circ)$ – первый измерительный канал;

$\psi_0 \in (90^\circ, 270^\circ)$ – второй измерительный канал;

$\psi_0 \in (0^\circ, 180^\circ)$ – третий измерительный канал;

$\psi_0 \in (180^\circ, 360^\circ)$ – четвертый измерительный канал.

Сигнал на выходе i -го измерительного канала, где $i = 1, 2, 3, 4$, может быть представлен следующим образом:

$$u_i = \sum_{n=0}^N s'_n \int_{\psi_i} F(\theta_n, \varphi_n, \psi_0) d\psi_0 = s_0 D_i^0(\theta_0, \varphi_0) + s_n D_i^n(\theta_n, \varphi_n), \quad (5)$$

где $F(\theta_n, \varphi_n, \psi_0)$ – ДН зеркальной антенны, определяемая выражением (3); s_0 – комплексная амплитуда принимаемого сигнала с направления θ_0, φ_0 соответствующего окрестности равносигнального направления (при $n=0$ $s_n = s_0$); s_n – комплексная амплитуда принимаемых антенной помех ($n=1,2,\dots,N$); θ_n, φ_n – угловые координаты источников помех; D_i^n – значения дискриминационной характеристики i -го измерительного канала в направлении на n -ую помеху. Для сокращения записи в правой части выражения (5) оператор суммирования заменен суммированием по неммым индексам [4].

Поскольку операция суммирования является линейной, то результирующие сигналы (5) измерительных каналов не изменятся, если данное выражение представить в следующем виде:

$$u_i = \sum_{q=1}^Q \sum_{n=0}^N w_{iq} s_n \int_{\psi_{iq}} F(\theta_n, \varphi_n, \psi_0) d\psi_0 = w_{iq} s_0 D_i^{0q} + w_{iq} s_n D_i^{nq}, \quad (6)$$

где ψ_{iq} – q -ая подобласть угловых положений облучателя в процессе конической развертки, соответствующая i -му измерительному каналу; w_{iq} – весовые коэффициенты. Число подобластей Q ограничивается допустимым снижением отношения сигнал / шум в канале и, следовательно, может меняться в зависимости от расстояния до цели.

Отметим, что для существующей измерительной системы весовые коэффициенты одинаковы и равны $w_{iq} = 1$. Однако такой выбор коэффициентов не оптимален с точки зрения отношения сигнал / помеха + шум (ОСПШ). Воздействие мощных помех может приводить к снижению ОСПШ и искажению значений сигналов измерительных каналов.

В каждом измерительном канале величина ОСПШ с учетом выражения (6) может быть определена с помощью выражения:

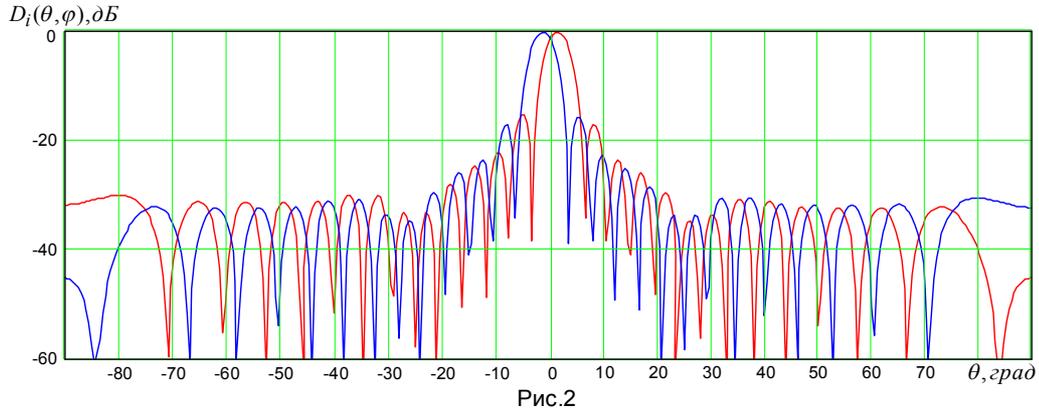
$$R_i = \frac{w_{iq} \left(s_0 D_i^{0q} \right) \left(s^{0*} D_{i0e}^* \right) w_i^{e*}}{w_{iq} \left(s_n D_i^{nq} \right) \left(s^{n*} D_{ine}^* \right) w_i^{e*} + P_{\emptyset i}}; \quad q, e = 1, 2, \dots, Q, \quad (7)$$

где символ «*» обозначает операцию комплексного сопряжения; $P_{\emptyset i}$ – мощность собственных шумов антенной системы в i -ом канале.

В соответствии с известной литературой (см. например [5]) весовые коэффициенты w_{iq} , обеспечивающие максимизацию функционала (7), для каждого i -го измерительного канала представляют собой собственный вектор, отвечающий максимальному собственному значению матрицы:

$$C_{ie}^q = \left[\left(s_n D_i^{nq} \right) \left(s^{n*} D_{ine}^* \right) \right]^{-1} \left[\left(s_0 D_i^{0q} \right) \left(s^{0*} D_{i0e}^* \right) \right]. \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим зеркальную антенну радиуса $R = 7\lambda$ с облучателем, смещенным в фокальной плоскости на $0,75\lambda$, и фокусным расстоянием $f = 20\lambda$. В этом



случае максимум ДН в каждый момент времени смещен относительно равносигнального направления на угол $2,15^\circ$.

Предположим, что в направлении $\theta_1 = 30^\circ$, $\varphi = 0$ действует источник помехи, превышающий уровень сигнала на 40 дБ.

На рис. 2 представлены дискриминационные характеристики двух измерительных каналов, позволяющие оценить смещение цели из равносигнального направления вдоль оси Ox декартовой системы координат, описываемые функциями:

$$D_i(\theta, \varphi) = \sum_{q=1}^Q D_{iq}(\theta, \varphi); i = 1, 2. \quad (9)$$

На данном рисунке сплошная кривая соответствует $i=1$, пунктирная кривая – $i=2$.

В направлении на источник помехи дискриминационные характеристики двух каналов не имеют запаса помехоустойчивости, так как их ОСПШ приблизительно равны $-8,1$ дБ в первом канале и $-3,1$ дБ во втором канале соответственно. В результате при совмещении цели с равносигнальным направлением отношение амплитуд сигналов равно $8,27$, а при смещении цели на $0,36^\circ$ – $6,54$. Это означает, что в каналах обработки принимаемой информации в заданных условиях помеховой обстановки не обнаружится смещение цели, поскольку при корректной работе системы смещение цели должно приводить к увеличению отклонения соотношения амплитуд сигналов измерительных каналов от единицы.

Определим весовые коэффициенты w_{iq} с помощью процедуры оптимизации. Соответствующие данному решению дискриминационные характеристики представлены на рис. 3. Обозначения на данном рисунке совпадают с обозначениями, введенными на рис. 2.

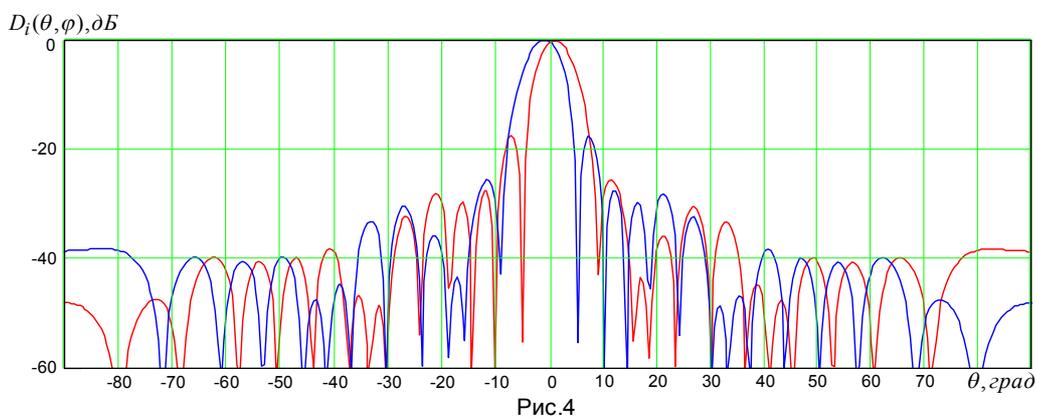
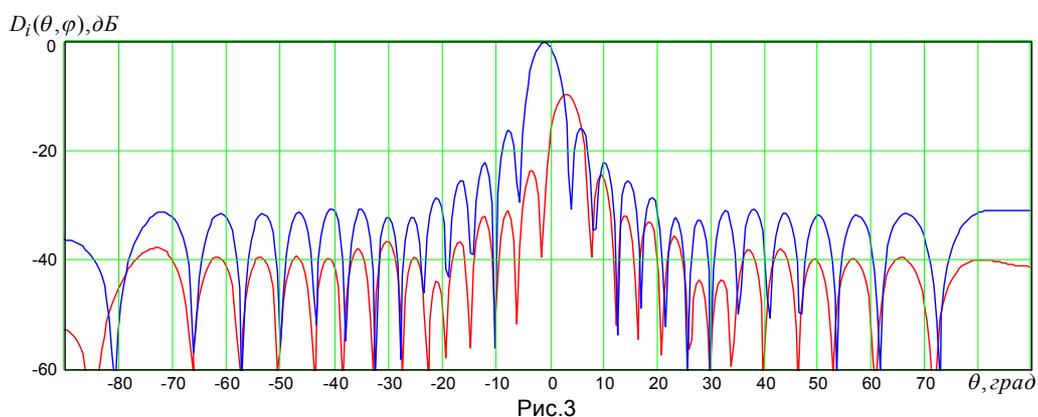
Как следует из рис. 3, в направлении на источник помехи сформирован глубокий нуль дискриминационной характеристики после выполнения процедуры оптимизации. Величина ОСПШ в каждом из измерительных каналов будет достаточной для работы системы и равна 18 и 32 дБ соответственно. Смещение цели из равносигнального направления можно оценить путем сравнения соотношений амплитуд сигналов

измерительных каналов, равных 0,14 и 0,21 при совмещении цели с равносигнальным направлением и минимальном смещении цели от него. Однако асимметрия и разница уровней максимумов дискриминационных характеристик, которые заметны на рис. 3, не позволяют сделать однозначный вывод о нахождении цели в равносигнальном направлении.

Для получения симметричных дискриминационных характеристик измерительных каналов будем формировать «нули» этих дискриминационных характеристик симметрично относительно равносигнального направления.

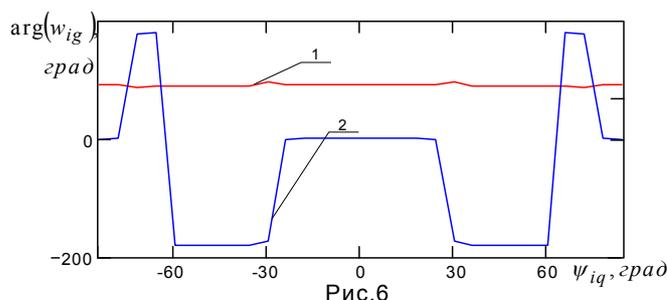
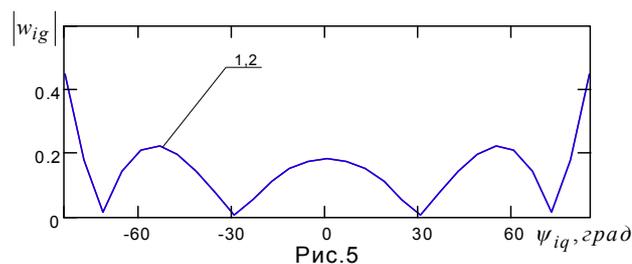
Результаты исследований для этого случая представлены на рис. 4.

Увеличение числа формируемых «нулей» приводит к изменению ОСПШ в измерительных каналах до значений 30 и 21 дБ соответственно. Уровни максимумов дискриминационных характеристик стали одинаковыми и симметричными. При этом



соотношение амплитуд сигналов в измерительных каналах равно 1,001 при совмещении цели с равносигнальным направлением и 1,102 - при отклонении цели. Это свидетельствует о том, что отклонение цели от равносигнального направления будет фиксироваться измерительными каналами обработки принимаемой информации.

На рис. 5 и 6 представлены соответственно амплитуды и фазы векторов весовых



коэффициентов, обеспечивающих оптимизацию ОСПШ при сохранении симметрии дискриминационных характеристик измерительных каналов. Номера кривых на данных рисунках соответствуют номерам измерительных каналов.

Таким образом, предлагаемый метод энергетической оптимизации позволяет обеспечить корректную работу каналов обработки принимаемой информации при использовании зеркальных антенн с конической разверткой луча в условиях мощных помех. Достоинством метода является возможность его применения как в одноканальных антенных системах, так и многоканальных антеннах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2141706 (РФ). Способ и устройство адаптивной пространственной фильтрации сигналов // В.Ф.Комарович, Л.А.Марчук, А.А.Прасько, С.В.Спирин.- Оpubл. 1995.07.20 – Н01Q 3/26, Н01Q 21/00.
2. Патент 2040083 (РФ). Способ и устройство управления лучом фазированной антенной решётки // А.В.Немцов, Н.А.Садовничая. - Оpubл. 1998.11.20 – Н01Q 21/00.
3. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. - М.: Горячая линия — Телеком, 2004.-491 с.
4. Рашевский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. - М.: Наука, 1967.- 664 с.
5. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки: введение в теорию: пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1986. - 448 с.