РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.391.8

О. С. Антропов, С. М. Вовк, В. Ф. Борулько

МЕТОД МИНИМУМА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

Рассмотрена задача определения диаграммы направленности антенны путем восстановления распределения токов в плоскости раскрыва антенны по данным ближнего поля. Для решения обратной задачи восстановления распределения токов применен метод минимума пространственной протяженности. Диаграмма направленности антенны получена путем преобразования Фурье поля в раскрыве. Представлены результаты численного моделирования для случая одномерной апертуры.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных и актуальных задач теории антенн является задача определения диаграммы направленности антенны (ДНА) по результатам измерения ее ближнего поля. На практике этот вид измерений наиболее распространен, поскольку позволяет минимизировать искажающее влияние окружающей среды и дает возможность оценить ДНА посредством преобразования Фурье. Однако при практическом использовании результатов измерений ближнего поля возникают трудности, обусловленные конечным размером области измерений. Так, при использовании стандартной процедуры пересчета ближнего поля в дальнее поле, часть ближнего поля, которая не охвачена областью измерений, обычно полагается равной нулю [1]. Это приводит к неточному восстановлению распределения поля в дальней зоне вне некоторого диапазона углов, определяемого размерами антенны и области измерений, из-за появления в расчетах так называемой ошибки усечения. Для уменьшения ошибки усечения необходимо либо увеличить размер области измерений, либо ввести ограничения на физический размер исследуемых антенн. Это обуславливает необходимость поиска методов, позволяющих обойти указанные выше трудности.

Для решения указанной задачи было предложено несколько методов. Один из методов [2] использует априорную информацию о геометрии антенны и данные измерений ближнего поля для оценивания эквивалентного распределения магнитных токов на плоскости раскрыва антенны с последующим получением дальнего поля. Другой метод [3] использует дополнительную математическую обработку результатов измерений ближнего поля на основе геометрических характеристик антенны. Идея этого метода основана на экстраполяции измеренных данных ближнего поля за пределы области измерений. Это позволяет получить эквивалентную область измерений, превышающую физически доступную. Так как данный метод основан на построении квадратичного функционала для модуля невязки измеренного поля и вычисляемого поля, то полученное решение будет неустойчивым и для получения устойчивого решения используется техника регуляризации Тихонова [4]. После восстановления поля в ближней зоне, оба метода используют прямой пересчет распределения поля в ближней зоне в распределение поля в дальней зоне с помощью стандартных алгоритмов преобразований, основанных на алгоритмах быстрого преобразования Фурье. Существенным ограничением указанных и других аналогичных методов является необходимость располагать точными априорными сведениями о геометрических характеристиках исследуемой антенны. Если же такие априорные сведения являются неточными или отсутствуют, то применение указанных методов становится проблематичным.

В [5] мы предложили новый подход к обработке результатов измерений ближнего поля. Идея этого подхода заключалась в замене стандартной техники регуляризации на новую технику, которая основана на критерии минимума пространственной протяженности решения. Применение этого подхода позволяет достичь существенного улучшения результатов восстановления поля точечных источников, расположенных в раскрыве антенны, при отсутствии априорных сведений об их местоположении. В данной работе предлагается использовать этот подход для решения задачи определения ДНА по результатам измерений ближнего поля антенны. Ключевым моментом предлагаемого подхода является предположение о финитности пространственного распределения токов в раскрыве антенны, представленного набором точечных источников при отсутствии априорных сведений об их местоположении.

1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Представление распределения поля в дальней зоне посредством преобразования Фурье от пространственного распределения токов в раскрыве антенны [6] является вычислительно эффективным и не содержит в себе погрешности, обусловленные ошибкой усечения. Следовательно, успешность решения задачи определения ДНА определяется результатом решения обратной задачи восстановления токов в раскрыве антенны. Для демонстрации общего подхода к решению данной обратной задачи используем простую модель, которая описывает измеренные данные $b(\xi)$ ближнего поля антенны и распределение токов $a(r)$ в области S апертуры антенны в рамках скалярной задачи уравнением:

$$b(\xi) = \int\limits_{S_0} a(r)\frac{e^{-ik|\xi - r|}}{|\xi - r|}dr + N(\xi);\ \xi \in M, \qquad (1)$$

где M – область измерений, $N(\xi)$ – аддитивный пространственный шум, S_0 – неизвестная область распределения токов в области S, т. е. $S_0 \subset S$. Последнее означает, что если $r \in S_0$, то $a(r) \neq 0$, но если $r \notin S_0$, то $a(r) = 0$. Феноменологическая постановка обратной задачи восстановления токов в области апертуры антенны формулируется следующим образом: найти распределение токов $a(r)$ по известным значениям поля $b(\xi)$ в условиях, когда эти известные данные искажены шумом и область S_0 априорно неизвестна.

Отметим, что из (1) следует принципиальная невозможность точного определения $a(r)$ в условиях ограниченной области измерений M и наличия шума. Действительно, источники тока всегда ограничены в пространстве и создают поле во всем пространстве. Но если только часть этого пространства доступна для непосредственных измерений, то, во-первых, происходит потеря части полезной информации и, во-вторых, доступная полезная информация является искаженной из-за наличия измерительного шума.

Ясно, что потерянная информация может быть восстановлена только искусственно на основе априорной информации, объем которой должен быть адекватен объему потерянной информации. Априорная информация, которая явно присутствует в модели (1), заключается в том, что искомое решение $a(r)$ должно описываться финитной функцией, так как область S_0 априорно ограничена. Теоретически такая априорная информация является достаточной для восстановления функции $a(r)$ по любому известному сегменту данных $b(\xi)$. Однако наличие шума и отсутствие знания или неточное знание области S_0 не позволяют эффективно применять соответствующие известные схемы восстановления. В этих условиях мы предлагаем решать уравнение (1) таким образом, чтобы пространственная протяженность области S_0, где сосредоточены источники, была минимальной.

Рассмотрим случай, когда источники тока расположены вдоль оси OX, а измерения ближнего поля выполняются вдоль линии, отстоящей от источников на расстоянии z, причем линия измерений параллельна оси OX и лежит в плоскости $y = 0$. Тогда можно переписать (1) в виде:

$$b(\xi) = \int\limits_{S_0} a(x)\frac{e^{-ik\sqrt{(\xi - x)^2 + z^2}}}{\sqrt{(\xi - x)^2 + z^2}}dx + N(\xi). \qquad (2)$$

Поскольку задача решения уравнения (2) относительно $a(x)$ является некорректной обратной задачей, то для получения устойчивого решения нужна процедура регуляризации. Вместо стандартной квадратичной регуляризации, основанной на добавлении члена в виде энергии решения, используем нелинейную регуляризацию, добавляя неэнергетический член в форме, описывающей пространственную протяженность решения [5]. Это приводит к формулировке следующей задачи минимизации:

$$\int_M \left| b(\xi) - \int_S a(x) \frac{e^{-ik\sqrt{(\xi-x)^2+z^2}}}{\sqrt{(\xi-x)^2+z^2}} dx \right|^2 d\xi + \\ + \gamma^2 \int_S \psi[a(x);\alpha,\beta,\ldots]dx \to \min_{a(x)}, \qquad (3)$$

где γ^2 – параметр регуляризации. Первый член в (3) является мерой ошибки полученного решения по области измерений; второй член определяет пространственную протяженность решения в качестве регуляризирующего члена. Отметим, что функция ψ, представленная в (3), может иметь различные варианты [7]; здесь используем следующую форму представления:

$$\psi[s(x);\alpha,\beta] = [|s(x)|^2/A^2+\alpha^2]^\beta - \alpha^{2\beta}; \\ 0<\beta\le 0,5, \qquad (4)$$

где параметры α, β позволяют управлять поведением функции ψ. Результаты численного моделирования показали [5, 7, 8], что наиболее удачным является такой выбор: $\alpha \approx \sigma$; $\beta = 1/16$, где σ – стандартное отклонение измерительного шума.

Решение задачи (3) будем называть решением по методу минимума пространственной протяженности (РММПП). Из (3) следует, что если для всех x выполняется: $\alpha^2 >> |a(x)|^2$, то РММПП стремится к решению, получаемому при обычной регуляризации Тихонова с использованием энергетического члена. Кроме того, увеличение γ^2 до очень больших значений приближает РММПП к нулевому решению, а использование малых γ^2 приводит к решению без регуляризации. Таким образом, можно утверждать, что для каждого значения дисперсии шума существует некоторое наилучшее значение параметра регуляризации γ^2, при использовании которого абсолютная ошибка решения будет минимальной.

После решения задачи (3) с целью восстановления функции $a(x)$, описывающей распределение токов антенны, соответствующая ДНА определяется через преобразование Фурье:

$$F(u) = \frac{1}{2\pi}\int_S a(x)e^{jux}dx, \qquad (5)$$

где $u = k\sin\theta = 2(\pi/\lambda)\sin\theta$; θ – угол между направлением излучения и внешней нормалью к апертуре антенны. После этого результат можно перевести в пространство углов с учетом только тех пространственных частот, которые соответствуют диапазону $[-\pi/2, \pi/2]$.

2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Цель проведения численного моделирования заключалась в сопоставлении результатов определения ДНА по измерениям ближнего поля при применении двух методов регуляризации решения обратной задачи: квадратичной регуляризации Тихонова [3, 4] и регуляризации по методу минимума пространственной протяженности. Для моделирования исходное распределение токов было задано в виде набора точечных источников, расположенных на оси OX в заданных узлах дискретной сетки, которая имела равномерный шаг Δx. Предполагалось, что измерение комплексной амплитуды ближнего поля было проведено вдоль отрезка прямой линии с шагом $\Delta\xi$, отстоящей от линии источников на расстояние z. Учитывая (2), для численного моделирования была использована следующая система уравнений:

$$b_p = \sum_{q=1}^{Q} a_q \frac{e^{-i2\pi\sqrt{[q(\Delta x/\lambda)-p(\Delta\xi/\lambda)]^2+(z/\lambda)^2}}}{\lambda\sqrt{[q(\Delta x/\lambda)-p(\Delta\xi/\lambda)]^2+(z/\lambda)^2}} + N_p; \\ p = \overline{1,P}, \qquad (6)$$

где b_p – известные данные, представленные комплексными значениями, $P = 100$; $\Delta x/\lambda = 0{,}1$; $\Delta\xi/\lambda = 0{,}1$; $z/\lambda = 2$; $Q = 100$, причем амплитуды точечных источников $a_q = 1$ для $q = 40,\ 50,\ 60,\ 70,\ 80$, и $a_q = 0$ для других q, N_p – комплексный аддитивный гауссовский шум.

Полученные результаты численного решения обратной задачи (6) с использованием квадратичной регуляризации Тихонова и регуляризации по методу минимума пространственной протяженности приведены на рис. 1. На рис. 2 приведены графики соответствующих ДНА, которые были рассчитаны посредством дискретного преобразования Фурье и приведены к диапазону углов $[-\pi/2,\ \pi/2]$. При численном моделировании, выполненном для 100 различных реализаций шума при отношении сигнал/шум +20 дБ, средний квадрат ошибки расчета ДНА по методу стандартной регуляризации Тихонова относительно истинной ДНА составил величину 6,87 %, тогда как для регуляризации по методу

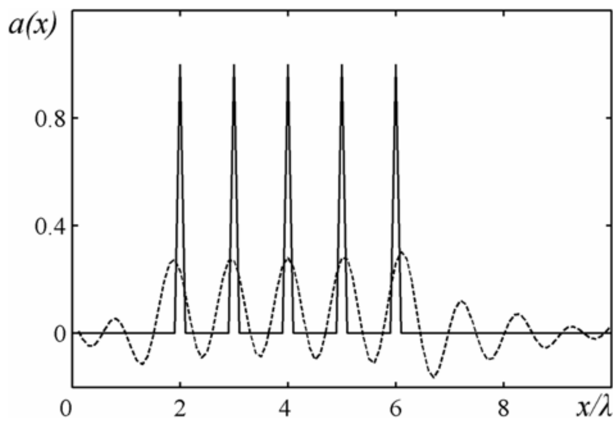

Рисунок 1 – Пространственное распределение токов:
пунктирная линия – стандартная регуляризация;
непрерывная линия – предлагаемая регуляризация

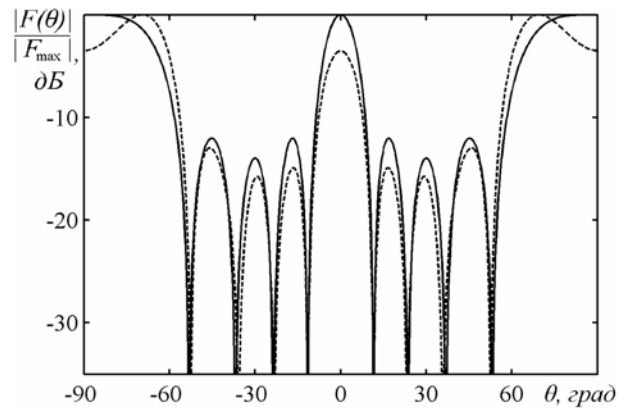

Рисунок 2 – Восстановленные ДНА:
пунктирная линия – стандартная регуляризация;
непрерывная линия – предлагаемая регуляризация

минимума пространственной протяженности эта величина составила менее 0,27 %, причем при применении предлагаемого метода наблюдалось визуальное совпадение полученной ДНА с истинной ДНА.

Таким образом, можно заключить, что предложенный метод позволяет уменьшить ошибку расчета ДНА по сравнению со стандартным подходом.

ВЫВОДЫ

Решение задачи определения ДНА целесообразно выполнять путем восстановления распределения токов в плоскости раскрыва с последующим преобразованием полученного распределения токов в значения ДНА. Данный подход обеспечивает возможность получения оценок ДНА в произвольном диапазоне углов, так как при этом не возникает ошибка усечения данных из-за ограниченности области измерений ближнего поля. Применение метода минимума пространственной протяженности обеспечивает возможность решения обратной задачи при отсутствии априорных сведений о геометрии излучающей системы, причем применение функционала минимума пространственной протяженности в качестве регуляризирующего члена имеет преимущество по сравнению с традиционным подходом на основе квадратичной регуляризации. Результаты численного моделирования для случая одномерной апертуры подтвердили работоспособность и эффективность предложенного подхода.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. *Yaghjian A. D.* An overview of near-field antenna measurements // IEEE Transactions Antennas Propagation. – 1986. – Vol. AP-34. – Pp. 30–45.
2. *Petre P., Sarkar T. K.* Near-field to far-field transformation using an equivalent magnetic current approach // IEEE Transactions Antennas Propagation. – 1992. – Vol. 40, No. 11. – Pp. 1348–1356.
3. *Bolomey J.–C., Bucci O. M., Casavola L., D'Elia G., Migliore M. D., Ziyyat A.* Reduction of truncation error in near-field measurements of antennas of base-station mobile communication systems // IEEE Transactions Antennas Propagation. – 2004. – Vol. AP-52, No. 2. – Pp. 593–602.
4. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 286 с.
5. *Вовк С. М., Борулько В. Ф.* Регуляризація даних антенних вимірювань на основі обмеження просторової протяжності струмів. // Вісник Дніпропетровського національного університету. – 2006. – № 2/3. – С. 9–11.
6. *Минкович Б. М., Яковлев В. П.* Теория синтеза антенн. – М: Сов. Радио, 1969. – 269 с.
7. *Вовк С. М., Борулько В. Ф.* Метод минимума длительности для восстановления финитных сигналов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1991. – Т. 34, № 9. – С. 66–69.
8. *Вовк С. М., Борулько В. Ф.* Відновлення рефлектограм за допомогою екстраполяції широкосмугових НВЧ-вимірювань методом мінімуму тривалості // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2005. – № 1. – С. 5–8.

Надійшла 5.03.2008
Після доробки 9.04.2008

Розглянута задача визначення діаграми спрямованості антени шляхом відновлення розподілу струмів у площині розкриву антени за даними ближнього поля. Для розв'язку оберненої задачі відновлення розподілу струмів використано метод мінімуму просторової протяжності. Діаграма спрямованості антени отримана за допомогою перетворення Фур'є поля у площині розкриву. Представлені результати чисельного моделювання для випадку одновимірної апертури.

The problem of far-field pattern determination from near-field data measurements through restoration of currents distribution on the aperture plane is considered. Extension minimum method is applied for currents estimation inverse problem. Fourier transform applied afterwards to determine far-field pattern. Simulation results are presented for one-dimensional aperture case.