Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация-МСЭ-R SA.1345-1
(01/2010)

Методы прогнозирования диаграмм направленности излучения больших антенн, используемых для космических исследований и в радиоастрономии

Серия SA

Космические применения и метеорология

Международный союз электросвязи

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайновой форме по адресу: http://www.itu.int/publ/R-REC/en.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	**Космические применения и метеорология**
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – *Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 МСЭ-R.*

Электронная публикация
Женева, 2010 г.

© ITU 2010

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SA.1345-1

Методы прогнозирования диаграмм направленности излучения больших антенн, используемых для космических исследований и в радиоастрономии

(1998-2010)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описаны методы, которые должны применяться для прогнозирования диаграмм направленности излучения больших антенн, используемых для космических исследований и в радиоастрономии, с учетом искажений поверхности рефлектора при моделировании диаграммы излучения антенны.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что во многих случаях зеркальные антенны, используемые в космических исследованиях и в радиоастрономии, подобны в том, что они имеют большой диаметр и работают на частотах до десятков ГГц;

b) что из-за больших расстояний, требуемых для достижения обычных условий дальнего поля ($2D^2/\lambda$), стандартный антенный испытательный диапазон или размеры безэховой камеры являются неприемлемыми, однако прогнозы диаграмм направленности излучения очень больших антенн могут в некоторых случаях быть проверены калиброванными измерениями;

c) что большое число потенциальных источников наземных помех этим двум службам будут расположены в ближнем поле антенны;

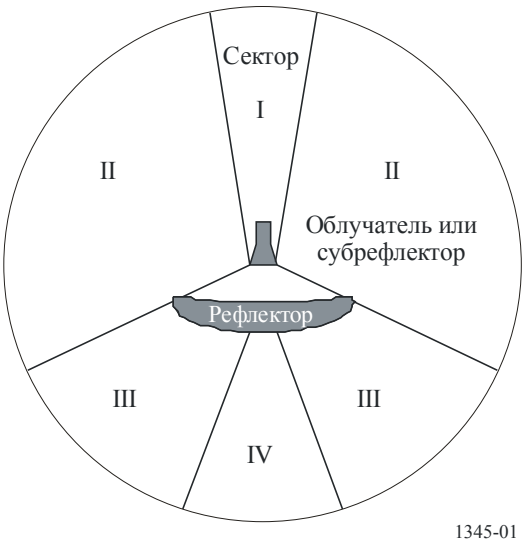
d) что точные модели и связанное с ними программное обеспечение становятся доступными для прогнозирования диаграмм направленности излучения антенн как в ближнем, так и в дальнем поле, а также для ситуаций, при которых учитывается взаимодействие с субрефлекторами или нежелательными препятствиями,

рекомендует,

1 что в случае, когда требуется выбор наиболее подходящего метода моделирования для прогноза диаграммы направленности больших рефлекторных антенн, следует использовать методы, описанные в Приложении 1 и сведенные в нижеследующую таблицу:

РИСУНОК 1

Сектора для анализа рефлектора



Рекомендованные методы анализа	
Сектор I Передний аксиальный сектор	Физическая оптика
Сектор II Дальние боковые лепестки	Геометрическая теория дифракции/однородная теория дифракции и соотношения наведенного поля
Сектор III Задние лепестки	Геометрическая теория дифракции/однородная теория дифракции
Сектор IV Задний аксиальный сектор	Эквивалентные краевые токи

2 что в случае методов моделирования, включающих измерения, в качестве руководства по выбору наиболее подходящего метода следует использовать описание метода в Приложении 2;

3 что при определении значимости влияния механических характеристик антенны, которая будет моделироваться, следует учитывать перечисленные ниже факторы:

a) рассеивание, обусловливаемое стойками поддержки облучателя, при определении уровней боковых лепестков;

b) избыток прямого излучения от облучателя; и

c) поверхностные искажения.

Приложение 1

Пригодность различных электромагнитных методов моделирования для прогнозирования диаграммы направленности и диаграммы излучения больших антенн

1 Введение

Существует большое число методов, которые можно использовать для решения электромагнитных задач. Каждый из этих методов может иметь преимущества для моделирования конкретных задач, но быть неприменимым для решения других. В данном приложении рассматриваются методы, используемые для моделирования рефлекторных антенн, а также рассматривается их пригодность для анализа больших рефлекторных антенн, обычно используемых для космических исследований и в радиоастрономии.

2 Аналитические и численные методы

2.1 Метод моментов

Метод моментов – это математический способ решения неоднородных линейных уравнений типа:

$$Lf = g, \tag{1}$$

где L – обычно линейный интегро-дифференциальный оператор, а функции f и g – элементы гильбертовых пространств. В данном уравнении g известна, и идея заключается в том, чтобы для получения неизвестной функции $f = L^{-1}g$ инвертировать L. В этой процедуре используется метод преобразования операторного уравнения (1) в систему линейных алгебраических уравнений. Для этой цели неизвестная функция f выражается через ряд базисных функций $\{f_n\}$ с неизвестными постоянными коэффициентами $\{C_n\}$. Подставив это выражение обратно в уравнение (1) и беря скалярное произведение обеих сторон на множество известных испытательных функций $\{w_m\}$, приводим уравнение (1) к простому матричному уравнению вида:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \tag{2}$$

где **A** и **b** задаются скалярными произведениями $A_{mn} = \langle w_m, Lf_n \rangle$, $b_m = \langle w_m, g \rangle$, а **x** – вектор неизвестных коэффициентов $\{C_n\}$. Уравнение (2) легко решается для **x** с использованием элементарных численных методов и дает f.

Для применения данного метода к анализу рефлектора необходимо сформулировать задачу в форме уравнения (1). Это осуществляется путем выражения поля, рассеянного антенной, через интеграл неизвестных поверхностных токов на отражающей поверхности. Учитывая электромагнитное граничное условие того, что тангенциальная составляющая полного электрического поля должна быть нулевой для идеального проводника, получаем уравнение для плотности неизвестных поверхностных токов $\mathbf{J}_S$ в виде уравнения (1):

$$\mathbf{u}_n \times \int_S \mathbf{J}_S \cdot \left(\nabla\nabla + k^2\tilde{\mathbf{I}}\right) G \, \mathrm{d}S = -j\omega\varepsilon_0 \mathbf{u}_n \times \mathbf{E}^i , \tag{3a}$$

которое является интегральным уравнением Фредгольма первого типа. Здесь:

$\mathbf{u}_n$: единичная нормаль к поверхности;

$\tilde{\mathbf{I}}$: аффинор, описываемый как $\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{u}_x\mathbf{u}_x + \mathbf{u}_y\mathbf{u}_y + \mathbf{u}_z\mathbf{u}_z$;

G : скалярная функция Грина свободного пространства, задаваемая выражением:

$$G = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|},$$

где r' и r – расстояния для источника и точек наблюдения, соответственно;

$\mathbf{E}^i$: вектор падающего электрического поля;

$k = 2\pi/\lambda_0$: волновое число в свободном пространстве.

Уравнение (3a) может быть решено разделением поверхности на маленькие участки, через каждый из которых проходит $\mathbf{J}_S$ как сумма компонентов, текущих по двум ортогональным направлениям. Альтернативно, рефлектор может моделироваться в форме сетки из провода. Преимуществом этого является то, что рассеянное поле в этом случае может быть выражено как одномерный интеграл тока, текущего по проводу. Для случая тонкого проводного сегмента по направлению z, определенному единичным вектором $\mathbf{u}_z$, соответствующее уравнение вида (1) можно выразить следующим образом:

$$j\omega\mu_0 \int \left[I(z) + \left(1/k^2\right) I'(z)(\mathbf{u}_z \cdot \nabla)\right] G \, \mathrm{d}z = \mathbf{u}_z \cdot \mathbf{E}^i , \tag{3b}$$

где апостроф обозначает производную. Уравнение (3b) решается для неизвестного распределения тока путем раскладывания его по подходящему набору базисных функций.

В принципе это наиболее точный из всех известных методов, используемых при анализе электромагнитного рассеяния. Формулировка управляющего уравнения точна, и при подходящем выборе базисных и испытательных функций могут быть получены чрезвычайно точные решения. Кроме того, стойки, облучатель, субрефлектор и несущие конструкции могут быть все объединены в одну задачу. Хорошо определенные поверхностные неоднородности на рефлекторе могут моделироваться аналогичным образом. По существу, данный метод предусматривает фрагментацию цельной структуры на небольшие линейные плоские сегменты, к каждому из которых прямо применяется граничной условие, непосредственно полученное из уравнений Максвелла. Результатом этого является связанная система уравнений, в которой электромагнитное взаимодействие каждого сегмента с каждым другим сегментом учитывается автоматически. Поэтому данный метод пригоден для прогнозирования полной диаграммы направленности антенны во всех точках пространства с учетом эффекта влияния элементов поддержки антенны и связанных подсистем. В этом заключается трудность: в случае проводного сеточного решения, если рефлектор моделируется M проводными сегментами, а ток в каждом сегменте представлен N базисными функциями, результатом в общем случае будет система MN линейных уравнений со многими неизвестными, что требует численного решения $(MN)^2$ интегралов для получения элементов матрицы коэффициентов. Как правило, для точного представления токов необходимо от 10 до 20 сегментов на длину волны с тремя базисными функциями на сегмент, результатом чего является система с более чем 650 неизвестными величинами на квадратную длину волны отражающей поверхности.

На практике, однако, могут быть произведены некоторые упрощения. В случае рефлекторов с осесимметричным питающим фокусом для сокращения числа неизвестных коэффициентов может использоваться круговая симметрия. Кроме того, в проводных переходах, для того чтобы связать некоторые из неизвестных постоянных, может быть применен закон токов Кирхгофа. В численной электромагнитной программе (NEC), широко известном имеющемся на рынке пакете прикладных программ, реализующим метод момента, в котором используется уравнение (3b), ток $I(z)$ в каждом сегменте представляется как сумма трех составляющих – константы, синуса и косинуса. Из этих трех коэффициентов два устраняются в силу условия непрерывности заряда и тока в проводных соединениях, следовательно остается одна константа, которая определяет текущую амплитуду и должна быть вычислена матричными методами. Для обеспечения адекватности представления длина каждого проводного сегмента должна быть меньше $\lambda/10$, что дает более 220 сегментов на квадратную длину волны отражающей поверхности.

Для рефлектора диаметром 100λ в отсутствие симметрии этот метод требовал бы определения приблизительно 1,8 миллиона элементов в матрице коэффициентов $\mathbf{A}$ с последующей инверсией комплексной матрицы 1340×1340 элементов. Моделирование также подсистемы и структур поддержки привело бы к значительно большей системе уравнений. При увеличении размеров рефлектора кроме времени работы процессора быстро возрастают потребности в ресурсах памяти компьютера. Этот метод, таким образом, требует большого объема вычислений и неприменим для электрически больших рефлекторов. Максимальный типовой размер, для которого может успешно применяться метод момента, составляет 10λ. Если используется круговая симметрия, то могут быть проанализированы рефлекторы, размер которых составляет до 25λ. С появлением все более мощных компьютеров эти пределы непрерывно расширяются, однако возможность их применения к большим рефлекторным антеннам вызывает сомнение, по крайнем мере в ближайшем будущем.

2.2 Метод анализа поля в апертуре

В основе метода анализа поля в апертуре лежит теорема, гласящая, что если S – замкнутая поверхность, окружающая конечный набор источников Σ, то поле, обусловливаемое Σ в любой произвольной внешней к S точке, может быть выражено через интегралы векторов поля $\mathbf{E}_a$ и $\mathbf{H}_a$ по S, где нижний индекс a относится к тангенциальной составляющей. Таким образом, если S выбрана в виде сферы, окружающей антенну, тогда для измерения величины и фазы $\mathbf{E}_a$ и $\mathbf{H}_a$ по S может использоваться установка, сканирующая сферическое ближнее поле, и по этим значениям может быть вычислено поле антенны в каждой точке пространства вне S. Однако практически выполнить измерение ближнего поля по всей сферической поверхности, окружающей большой рефлектор, очень сложно, если не невозможно. Другой способ заключается в определении поля по S аналитическими методами, но в случае сложных подсистем это зачастую является трудноразрешимой задачей, требующей выполнения большого числа различных аппроксимаций.

Одна такая аппроксимация, называемая методом анализа поля в апертуре (см. рисунок 2a), основана на допущении, что $\mathbf{E}_a$ и $\mathbf{H}_a$ ненулевые только в ограниченном секторе S. Это справедливо для случая большого класса выпуклых рефлекторов с питающим фокусом, где существует ограниченный закрытый контур Γ_A, который ограничивает семейство всех зеркально отраженных лучей от освещенной стороны рефлектора. Проекция вдоль трасс отраженных лучей на S определяет сектор $A \in S$, ограниченный контуром Γ_A, по которому вычисляются $\mathbf{E}_a$ и $\mathbf{H}_a$ с использованием законов геометрической оптики, при $\mathbf{E}_a = 0$ и $\mathbf{H}_a = 0$ по $S - A$. Это условие определяет разрыв неопределенности по Γ_A, который противоречит уравнениям Максвелла.

Для того чтобы преодолеть эту трудность, плотности электрических и магнитных зарядов постулируются по Γ_A в соответствии с уравнением непрерывности. При этом условии поле, рассеянное рефлектором, задается выражением:

$$\mathbf{E}_s = \int_A \left[-j\omega\mu(\mathbf{u}_n \times \mathbf{H}_a) - j(\omega\varepsilon)^{-1}(\mathbf{u}_n \times \mathbf{H}_a) \cdot \nabla\nabla + (\mathbf{u}_n \times \mathbf{E}_a) \times \nabla \right] G \, \mathrm{d}S , \qquad (4)$$

где:

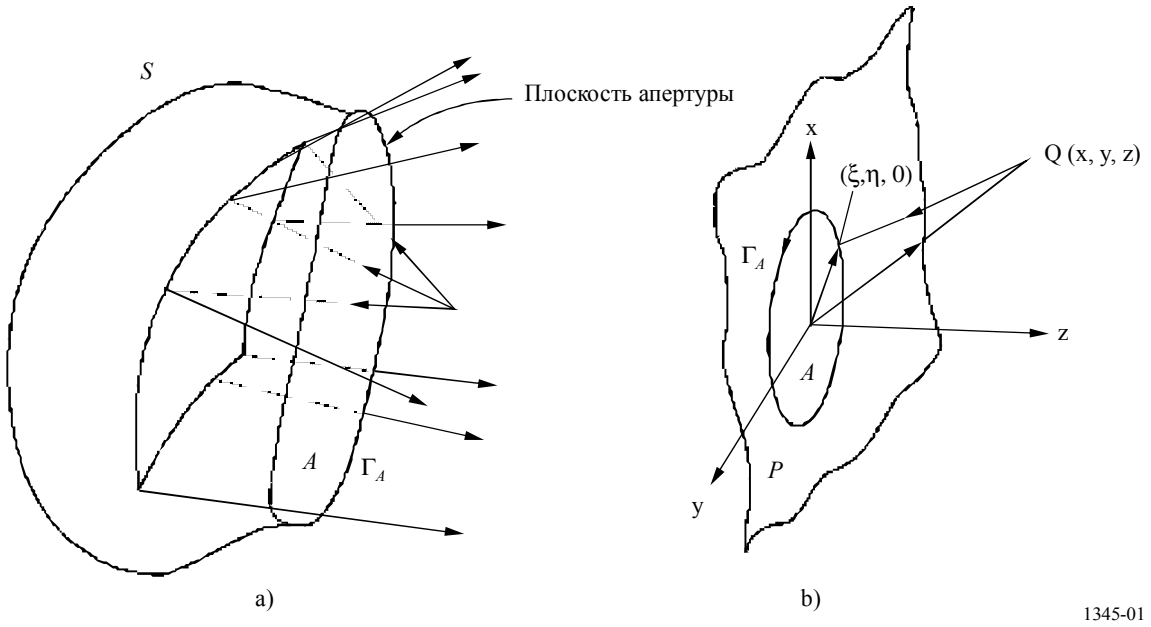
$\mathbf{u}_n$: внешняя единичная нормаль к A;

G : скалярная функция Грина свободного пространства.

Уравнение (4) составляет фундаментальный результат метода анализа поля в апертуре и применяется равным образом к случаям ближнего и дальнего поля, внешнего по отношению к *S*. В секторе дальнего поля антенны в уравнении (4) могут быть произведены некоторые упрощения, которые значительно уменьшат его вычислительную сложность. Однако главный недостаток этого уравнения – это разрыв, постулируемый на Γ_A, который далее преодолевается полностью искусственной конструкцией. Кроме создания формулы, согласованной с уравнениями Максвелла, добавление плотности электрического и магнитного зарядов на Γ_A не делает это уравнение более точным. Вместе с тем при практическом использовании уравнение (4) часто приводят к скалярному интегралу с помощью подходящего выбора *S*, что описано в п. 2.3. Этот метод шире известен именно в такой форме.

РИСУНОК 2

Метод анализа поля в апертуре



2.3 Скалярный интеграл излучения/проекционный апертурный метод

Проекционный апертурный метод (см. рисунок 2b)) является по существу упрощением метода анализа поля в апертуре, представленного в предыдущем разделе. Поверхность *S* – часть бесконечной плоскости *P* (которая выбрана на излучающей стороне рефлектора), замкнутой в бесконечности бесконечным полушарием на стороне источника, таким образом окружающей антенну. Поле по полусферическому сектору обращается в ноль (ввиду условий излучения), а правая часть уравнения (4) сводится к поверхностному интегралу по *P*. После ряда математических операций это уравнение может быть преобразовано в скалярный интеграл излучения:

$$E_s = -\int_P \left(G \frac{\partial F}{\partial n} - F \frac{\partial G}{\partial n} \right) \mathrm{d}S \,, \tag{5}$$

где F замещает любой декартов компонент электрического поля в апертуре, а $\partial/\partial n$ – производная по нормали. Уравнение (5) может быть записано в более удобном виде, если взять P совпадающим с x-y плоскостью, как показано на рисунке 2b), с источниками, ограниченными сектором $z < 0$. Это дает рассеянное поле E_s (x, y, z) в любой произвольной точке Q (x, y, z) как:

$$E_s(x,y,z) = \frac{1}{4\pi}\int_A F(\xi,\eta)\frac{e^{-jkr}}{r}\left[\left(jk + \frac{1}{r}\right)(\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_r) + jk(\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_s)\right] d\xi\, d\eta\,, \tag{6}$$

где:

r : расстояние от точки (ξ, η, 0) на апертуре к точке поля Q (x, y, z);

$\mathbf{u}_s$: нормаль единичного вектора к фронту волны в (ξ, η, 0);

$\mathbf{u}_r$ и т. д.: единичные векторы по направлениям, обозначенным соответствующими нижними индексами.

В уравнении (6) интеграл был сведен к конечной апертуре $A \in P$ с неявным предположением, что $F(\xi, \eta) = 0$ по $P - A$. Сектор A – поверхность, ограниченная кривой пересечения границы тени отражателя с P.

В секторе дальнего поля по направлению, определенному (θ, φ), уравнение (6) далее упрощается:

$$E_s(\theta,\varphi) = \frac{j}{\lambda r} e^{-jkr}\int_A F(\xi,\eta)\, e^{jk\sin\theta(\xi\cos\varphi + \eta\sin\varphi)}\, d\xi\, d\eta\,. \tag{7}$$

Уравнение (7) – широко известный скалярный дифракционный интеграл, который выражает дальнее поле через тангенциальное электрическое поле по плоской апертуре. При его выводе принимается, что фаза F несколько изменяется по A, однако этот факт часто не учитывается.

Уравнение (7) широко используется в прогнозировании диаграммы дальнего поля. Апертурное поле F (ξ, η) определяется с использованием геометрической оптики в секторе зеркально отраженных лучей. Поле отсекается по границе тени отражения Г, что приводит к разрыву в F (ξ, η) по Г. Это, конечно, не соответствует действительности. Тем не менее уравнение (7) широко использовалось в прошлом и дает верный прогноз основного лепестка и ближних боковых лепестков.

Интеграл и уравнение (7) можно вычислить в явной замкнутой форме для большого класса апертурных полей. Поскольку принято, что F является нулевым вне A, пределы интегрирования могут быть установлены от –∞ до ∞ без какой-либо потери точности, что приводит к виду двойного интеграла Фурье. Тогда для его численной оценки могут использоваться быстрые алгоритмы численных решений, подобные быстрому преобразованию Фурье (БПФ).

Этот метод сравнительно быстр, и для широкого диапазона различных антенн апертурного типа имеются эффективные программы, в которых используется этот метод. Если край рефлектора формирует плоский контур Г, A может быть выбрана так, чтобы быть ограниченной контуром Г. В таких случаях интеграл излучения уравнения (7) дает заметное вычислительное преимущество над аппроксимацией физической оптики (описана в п. 2.4), так как интеграл в уравнении (7) берется по плоской поверхности (в отличие от аппроксимации, где необходимо использовать подходящие системы криволинейных координат по изогнутым рефлекторам). В первую очередь можно прогнозировать искажения на поверхности рефлектора, которые являются большими в единицах длины волны, обычно такие, минимальный радиус кривизны которых равен более пяти длинам волны, что позволяет применять геометрическую оптику. Качественные последствия затенения раскрыва могут учитываться путем соответствующего прослеживания лучей. Эффект влияния стоек может быть включен в анализ с помощью метода, известного как соотношение наведенного поля (IFR), который описан в п. 2.6. Как отмечалось ранее, рассматриваемый апертурный метод может обеспечивать правильное прогнозирование только основного лепестка и нескольких первых боковых лепестков, а также, по необходимости, диаграмму направленности только в передней полусфере. Однако этот метод не может обеспечить прогнозирование с достаточной степенью точности кроссполярной диаграммы, и можно показать, что данный метод дает симметричные диаграммы даже в случаях, где имеется асимметрия в структуре фидера. В современном анализе рассматриваемый метод анализа поля в апертуре всегда используется в сочетании с методами ГТД (см. п. 2.5).

2.4 Физическая оптика

Физическая оптика (ФО) – это, по существу, аппроксимация, которая связывает поверхностный ток на проводнике с падающим электромагнитным полем. Рассеянное поле $\mathbf{E}_s$ в неограниченном секторе из-за совокупности электрических и магнитных источников тока $\mathbf{J}$ и $\mathbf{J}_m$, соответственно, ограничивается конечным объемом V и описывается выражением:

$$\mathbf{E}_s = -\frac{j}{\omega\varepsilon}\int_V \left[(\mathbf{J}\cdot\nabla)\nabla + k^2\mathbf{J} - j\omega\varepsilon\,\mathbf{J}_m \times \nabla\right] G\,\mathrm{d}v\,. \tag{8}$$

Если источник создает только индуцированный ток плотности $\mathbf{J}_s$ на идеальной проводящей поверхности S, уравнение (8) трансформируется в интеграл по поверхности S:

$$\mathbf{E}_s = -\frac{j}{\omega\varepsilon}\int_S \left[(\mathbf{J}_s\cdot\nabla)\nabla + k^2\mathbf{J}_s\right] G\,\mathrm{d}S\,. \tag{9}$$

Уравнение (9) является точным, и оно справедливо для всех точек в пространстве, внешнем к сектору источника (у реальных источников функция Грина G характеризуется сингулярностью). Если бы плотность поверхностного тока $\mathbf{J}_s$ была известна в каждой точке на поверхности рефлектора, тогда рассеянное поле в зонах как ближнего, так и дальнего поля можно было бы определить с помощью уравнения (9). К сожалению, величина $\mathbf{J}_s$ неизвестна и ее определение включает решение сложной краевой задачи. (Метод моментов – это, фактически, попытка разрешить эту проблему.)

Физическая оптика – это аппроксимация для выражения $\mathbf{J}_s$ в любой точке на рефлекторе через напряженность падающего магнитного поля $\mathbf{H}_i$ в данной точке. Конкретно предполагается, что:

$$\mathbf{J}_s = 2\mathbf{u}_n \times \mathbf{H}_i\,, \tag{10}$$

где $\mathbf{u}_n$ – единичная нормаль к S. Это подразумевает нулевой ток на частях поверхности рефлектора, не освещаемых прямо облучателем. Строго говоря, уравнение (10) справедливо только для бесконечной идеально проводящей плоскости. Фактическое распределение тока определяется (в отличие от определенного уравнением (10)) ограниченностью рефлектора, а также его кривизной. Если радиус кривизны, выраженный в единицах волны, велик, тогда уравнение (10) является весьма точным, кроме краев и зоны тени. Для повышения точности прогнозирования по краю могут быть добавлены периферийные токи, однако это значительно увеличивает сложность вычислений.

В секторе дальнего поля по направлению к $\mathbf{u}_r$ уравнение (9) сводится к:

$$\mathbf{E}_s = -\frac{jk^2}{\omega\varepsilon}\frac{\mathrm{e}^{-jkr}}{4\pi r}\left(\tilde{\mathbf{I}} - \mathbf{u}_r\mathbf{u}_r\right)\cdot\int_S \mathbf{J}_s(r')\exp(k\mathbf{r}'\cdot\mathbf{u}_r)\,\mathrm{d}S\,, \tag{11}$$

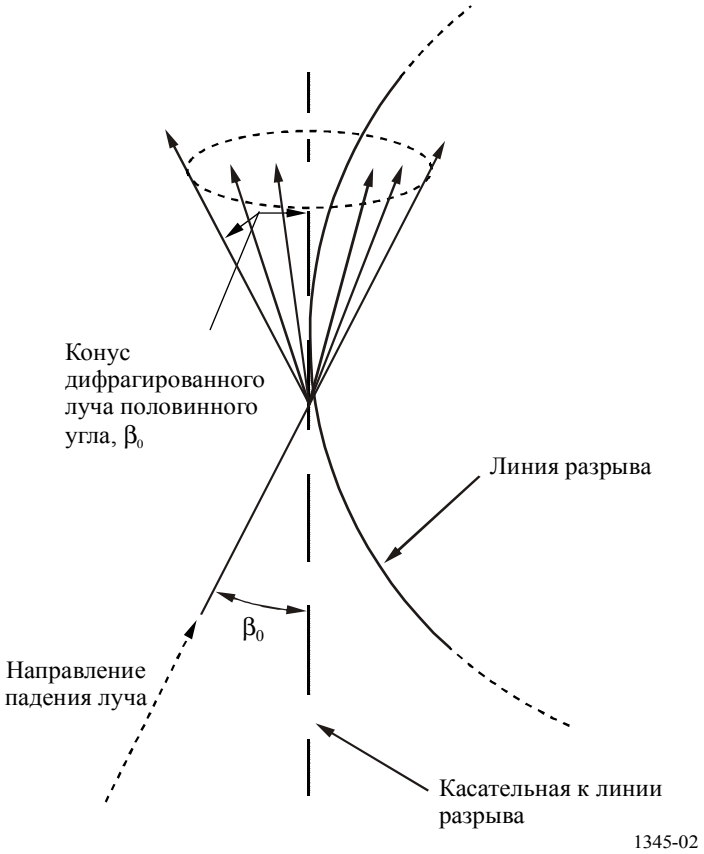
где $\tilde{\mathbf{I}}$ – единичный аффинор. Уравнение (11) – это стандартное выражение дальнего поля, используемое в аппроксимации ФО. В аспекте времени занятия процессора и требований к памяти метод ФО сопоставим с методом анализа поля в апертуре. Однако, по сравнению с последним, он, как правило, более точен и обеспечивает верное прогнозирование главного лепестка и ближних боковых лепестков. Он также обеспечивает лучшее прогнозирование диаграммы направленности при кросс-поляризации. Легко моделируются деформации гладких поверхностей. Кроме того, может быть учтено влияние стоек, облучателя и других подсистем, если принимать во внимание протекающие по их поверхности токи (полученные с помощью выражения ФО уравнения (10)), однако взаимодействие между различными источниками не учитывается, в результате чего такие прогнозируемые воздействия могут иметь только качественный характер. Физическая оптика в целом используется во всех случаях, кроме случаев, когда излучаемое поле может проецироваться на плоскую апертуру, сравнимую по размеру с самим рефлектором, и в этом случае проекционный апертурный метод становится существенно сложнее в вычислительном отношении. Как и метод анализа поля в апертуре, ФО теперь всегда используется вместе с методами высокочастотной дифракции.

2.5 Геометрическая теория дифракции

Геометрическая теория дифракции (ГТД) – высокочастотный метод, подходящий для анализа антенн, которые являются большими в единицах длины волны. Теория была разработана Иосифом Келлером в развитие геометрической оптики (ГО) для объяснения ненулевых полей в теневом секторе. Это достигается путем введения множества дифрагированных лучей, аналогичных отраженным и переданным лучам ГО. Дифрагированные лучи (рис. 3 и 4) возникают вследствие наличия граней, углов и любых подобных разрывов в поверхностной кривизне. Предполагается, что дифракция, подобно ГО, является строго локальным явлением: это означает, что дифрагированное поле зависит только от значения падающего поля в точке дифракции и от локальной геометрии дифрагирующего клина.

РИСУНОК 3

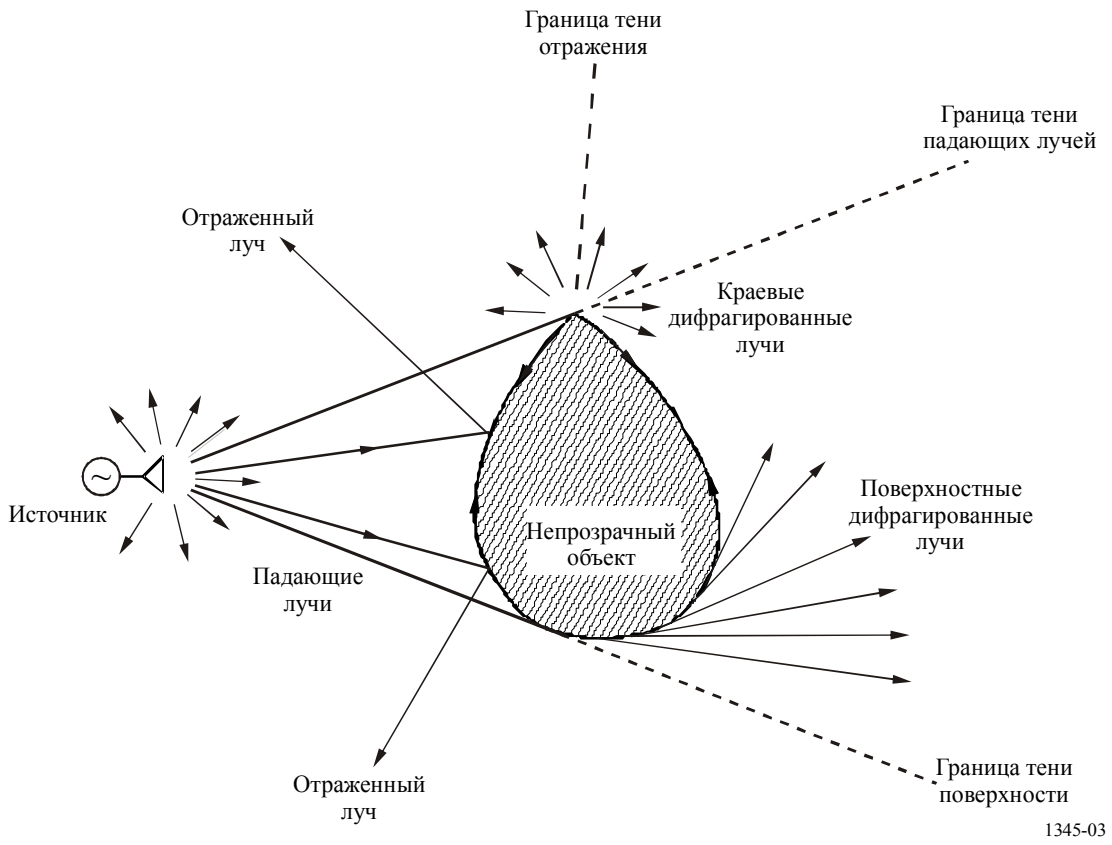
Дифрагированный луч, приходящий из линии разрыва



В ГО отраженное поле получается путем умножения падающего поля на коэффициент отражения. Подобным образом дифрагированное поле определяется умножением падающего поля на дифракционный коэффициент; последний находится как асимптотическое решение подходящей канонической задачи.

РИСУНОК 4

Луч, связанный с отражением и дифракцией от непрозрачной поверхности



ГТД наряду с ее расширениями является наиболее широко используемым высокочастотным методом для анализа рефлектора.

Согласно ГТД рассеянное поле $\mathbf{E}_s$ в окрестности точки в пространстве задается выражением:

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{E}_r + \mathbf{E}_d \,, \tag{12}$$

где $\mathbf{E}_r$ и $\mathbf{E}_d$ – поля ГО и ГТД, соответственно. Поле ГО равно:

$$\mathbf{E}_r \;=\; \widetilde{\mathbf{R}}\mathbf{E}_i \; H \, \mathrm{e}^{-jks} \,, \tag{13}$$

где:

$\widetilde{\mathbf{R}}$: диадический коэффициент отражения (составленный из коэффициентов Френеля для отражения от бесконечной диэлектрической плоской поверхности);

$\mathbf{E}_i$: падающее поле в точке отражения Q_R;

H: коэффициент расхождения, который зависит от основного радиуса кривизны фронта падающей волны и от радиусов кривизны отражающей поверхности в точке Q_R;

s: расстояние от Q_R до точки поля.

Дифрагированное поле определяется подобным образом:

$$\mathbf{E}_d \;=\; \widetilde{\mathbf{D}}\mathbf{E}_i \;\; L \, \mathrm{e}^{-jks} \,, \tag{14}$$

где:

$\widetilde{\mathbf{D}}$: диадический коэффициент дифракции;

L: аналогичный коэффициент расхождения.

Однако выражение Келлера для $\tilde{\mathbf{D}}$ неприменимо в переходных секторах, близких к границам отражения и тени, а также в каустических поверхностях. Чтобы преодолеть эту трудность, были сформулированы "однородные" теории, которые дают непрерывные функции через переходные сектора. Они включают однородную геометрическую теорию дифракции (ОТД) и однородную асимптотическую теорию (ОАТ). Обе теории дают значения D, которые не имеют особенностей в переходных секторах, и успешно применялись в прогнозировании дальнего поля в течение более чем двух десятилетий. Дифракционные коэффициенты содержат интегралы Френеля, которые легко вычисляются, обеспечивая таким образом быстрый и эффективный алгоритм для анализа больших рефлекторов. В вычислении по ГТД большая часть времени фактически расходуется на локализацию точек отражения и дифракции на рефлекторе, что дает положения источников и точек поля. Случаи нескольких рефлекторов и сложных геометрических форм могут иногда потребовать значительного времени вычислений, хотя и не столь значительного, как это необходимо для вычислений двойных интегралов по большим поверхностям.

Однако однородные теории непригодны в каустических поверхностях, определенных как сектора, где семейство лучей сходится, чтобы формировать фокусы или фокусные линии. Такие сектора могут быть проанализированы методом эквивалентного тока (МЭТ), который действует в обратном порядке от решения ГТД вдали от каустических поверхностей, с тем чтобы получить эквивалентный ток, который создал бы там идентичные поля. Этот ток затем используется, чтобы экстраполировать поле в каустических поверхностях. ГТД, ОТД, ОАТ и МЭТ – все дают сбой в секторах, где каустики ГТД и переходные сектора перекрываются. Такие сектора могут быть обработаны в соответствии с физической теорией дифракции (ФТД), которая является систематическим расширением подхода ФО, также как ГТД является расширением ГО. ФТД вычисляет электрические и магнитные краевые токи от полей ГО, касательных к краю. Для вычисления дифрагирующего поля необходимо интегрировать эти токи по длине края. В секторах, где применимы ФТД и ОТД/ОАТ, можно показать, что главные члены последнего могут быть восстановлены из решения ФТД. Однако применение ФТД включает дополнительное интегрирование по краю, но числовые вычисления показывают, что это не улучшает точность ОТД/ОАТ методов по внешним секторам, где каустические поверхности ГТД накладываются на границы тени ГО.

Главные преимущества ГО/ОТД/ОАТ состоят в том, что они обеспечивают возможность быстрых вычислений и могут использоваться на поверхностях произвольной формы с произвольными контурами, если поверхности и контуры имеют большие радиусы кривизны в единицах длины волны. Это означает, что хорошо определенные поверхностные неоднородности и деформации (вызванные, например, гравитационными эффектами) могут быть обработаны этими методами. Элементы облучателя и субрефлекторы могут учитываться посредством многократных отражений. В некоторых случаях неидеально проводящие поверхности и диэлектрические среды могут быть включены в анализ. Метод ГО/ОТД не работает по каустическим поверхностям, и в таких секторах должны использоваться альтернативные методы.

2.6 Затенение раскрыва и влияние конструкций

В этом разделе рассматриваются методы моделирования влияния конструкций и затенения раскрыва.

Фидерные устройства радиоастрономической антенны или антенны службы космических исследований, субрефлекторы, если таковые имеются, так же как связанные механические структуры поддержки и подачи кабеля, могут блокировать часть энергии, которая обычно достигает раскрыва антенны. Эта проблема, очевидно, намного более важна для осесимметричных систем, чем для систем со смещенным размещением. Однако эти проблемы затенения уменьшают эффективность антенны. Связанные эффекты проявляются как уменьшение усиления, существенное увеличение уровней боковых лепестков (по крайней мере, в некоторых направлениях), а также как ухудшение в поляризационной чистоте антенной системы.

Учет эффектов затенения при анализе диаграммы направленности антенны возможен при использовании любого метода типа ФО, апертурного интегрирования или ГО/ОТД.

Затенение субрефлектором и облучателем может приниматься во внимание путем рассмотрения оптических теневых эффектов на ФО поверхностных токах или апертурных полях. Это обычно адекватно, так как позволяет оценивать снижение усиления основного лепестка и изменения в

уровнях близких боковых лепестков. Аналогично, диаграмма направленности излучения, обусловленная первоначальным уменьшенным освещением, может вычитаться из освещения, которое будет существовать гипотетически на затененной части структуры. Если используется схема, при которой ФО переключается на ГО/ОТД по некоторым направлениям, тогда этот подход вычитания также может использоваться с той лишь разницей, что "чистая" диаграмма будет рассчитана методом ГО/ОТД. Поскольку основной лепесток из-за "блокированного освещения" является обычно намного более широким, чем основной лепесток полной диаграммы направленности, ФО или апертурное интегрирование может далее использоваться для вычисления затененной диаграммы направленности по более широким угловым секторам, чем диапазон применимости соответствующих методов для основной части диаграмм направленности основного рефлектора. Влияние стоек может также учитываться подобным способом, то есть путем рассмотрения оптических теневых эффектов. Это может быть успешным при условии, что сечение стойки является электрически большим. Если это не так, то точное прогнозирование влияния стоек также возможно при помощи соотношения наведенного поля (IFR). Основная философия, лежащая в основе концепции IFR, проста. Первичное питание после отражения от главного рефлектора освещает стойки и затем затеняется. Это поле освещения имеет в местном масштабе характер плоской волны. Следующий шаг состоит в том, чтобы найти двумерные (на единицу длины) "рассеивающие вперед" свойства бесконечно длинного объекта, беря то же сечение, которое имеет стойка, находящаяся под освещением плоской волной. Наконец, фактическое поле затенения стойкой и особенно переднее рассеянное поле, может быть рассчитано путем определения масштаба длины и вклада, соответствующего локальному освещению. Концепция IFR позволяет определить два соответствующих значения для двух независимых поляризаций, на которые локальные падающие плоские волны могут быть разложены. Следовательно, этот метод также позволяет оценить эффекты поляризации, обусловленные рассеиванием на стойках.

IFR – это величина, которая связывает фактическое переднее рассеянное поле стойки с полем затенения стойкой при теневых условиях геометрической оптики. Формальное определение IFR для цилиндрического объекта под освещением плоской волной заключается в том, что это отношение переднего рассеянного поля к гипотетическому полю, излучаемому в переднем направлении плоской волной с шириной, равной размеру оптической тени геометрического поперечного сечения цилиндра. Полезный аспект концепции IFR состоит в том, что фактическое значение IFR может быть определено аналитическим, численным (метод моментов, конечных элементов и т. д.) или даже экспериментальным методами, поэтому эффекты влияния стоек могут точно прогнозироваться. Аналитическая или численная оценка IFR также допускает как промежуточный шаг определение реальных или эквивалентных токов непосредственно на стойках. Поэтому в принципе может быть рассчитана полная веерообразная диаграмма рассеяния на стойке. В этом случае вышеупомянутый процесс корректно включает затенение стойкой и эффекты рассеивания по большому угловому сектору диаграммы направленности антенны.

Если поверхность рефлектора состоит из панелей, то межпанельная щелевая дифракция может влиять на диаграмму направленности излучения, также как на усиление по линии прицеливания. Эти эффекты, естественно, более сильные при увеличении рабочей частоты и должны быть приняты во внимание для антенн, которые планируются для использования на миллиметровых частотах. Концепция оптического затенения применима, если щели имеют электрически большую ширину. В противном случае может быть определено соотношение магнитного поля, созданного током, (MIFR), таким же образом, как и с помощью традиционной концепции IFR.

2.7 Погрешности поверхности рефлектора

Строгий анализ электромагнитного излучения рефлекторной антенной системы выполняется обычно для идеальных состояния поверхности и положений фидера, субрефлектора, основного рефлектора и т. д. Реальные условия обычно отличаются от идеальных вследствие погрешностей поверхности и рассогласования разных элементов. Эти ошибки, в общем, являются либо детерминированными, либо случайными.

Детерминированные ошибки можно относительно просто учесть при постановке задачи. Например, поверхностная деформация больших рефлекторных антенн вследствие силы тяжести вызывает провисание при наведении на разные углы места, а термическая деформация вследствие суточного

изменения температуры может быть учтена с помощью численного определения поверхности или различных аналитических функций, таких как радиальные полиномы Цернике в случае рефлекторов с круговой апертурой или сплайн-функции или другие интерполяционные функции. Таким образом, эти функциональные подборы к поверхности могут использоваться для анализа в целях борьбы с последствиями детерминированных ошибок.

Погрешности поверхности случайного или псевдослучайного типа возникают в основном в ходе производственного процесса или вследствие нарушения упорядоченного расположения ячеек, в случае если для создания большого рефлектора использовались небольшие ячейки. Эти погрешности сложно выявлять и анализировать, поэтому они должны быть определены и проанализированы статистическим образом. Статистические погрешности поверхности могут быть, как правило, приведены к гауссовой статистической стандартной форме по всей поверхности и характеризоваться двумя параметрами: среднеквадратической погрешностью поверхности σ и длиной корреляции C. Длина корреляции поверхности является показателем плотности погрешности по апертуре; ее значение невелико для близко расположенных погрешностей и велико для медленно изменяющихся погрешностей. Для определения этих двух параметров, с разной степенью точности, могут использоваться голографические и другие методы измерений, которые далее используются в статистическом анализе результирующей модели.

Наиболее известным является метод, впервые сформулированный д-ром Джоном Рузе[1] и дополненный другими учеными. Если поверхность рефлекторной антенны характеризуется среднеквадратической погрешностью σ, то отражаемый этой антенной фронт волны будет характеризоваться среднеквадратической ошибкой, фазовая погрешность которой, не принимая во внимание небольшую поправку на кривизну отражающей границы, описывается следующим уравнением:

$$\delta = \frac{4\pi\sigma}{\lambda}. \tag{15}$$

Рузе принял определенные допущения относительно пространственного характера корреляции и плотности вероятности фазовой погрешности в том, что фазовые значения полностью коррелируются для расстояний менее $2C$ и полностью не коррелируются для бóльших расстояний. Кроме того, разные фазы порождаются гауссовым семейством среднеквадратической ошибки δ. Среднее усиление в любом направлении рассчитывается вследствие этого путем добавления к усилению идеального рефлектора без погрешностей $G_0(\theta,\varphi)$ другого члена, который задается уравнением (16):

$$G(\theta,\varphi) = G_0(\theta,\varphi)\mathrm{e}^{-\delta^2} + \left(\frac{2\pi c}{\lambda}\right)^2 (1-\mathrm{e}^{-\delta^2})\Lambda_1\left(\frac{2\pi c\sin\theta}{\lambda}\right), \tag{16}$$

где Λ_1 – лямбда-функция (или нормированная функция Бесселя) первого рода. Это простейшая форма результата на основе так называемой аппроксимации-шапочки погрешностей. Рузе и другие использовали иные, более точные приближенные представления погрешностей. Однако они являются статистическими по характеру и применяются только к среднему и предельному значению большого числа антенн.

3 Выводы

Большинство методов, представленных в разделе 2, могут обеспечить точное прогнозирование диаграмм в дальнем поле в их соответствующих секторах применимости. В целом полная характеристика диаграммы направленности антенны наилучшим образом обеспечивается путем сочетания разных методов. Интегрирование физической оптики является наиболее широко используемым методом для анализа большого рефлектора. Этот метод дает точные результаты в секторе основного лепестка и ближних лепестков. Дополнение решений на основе физической оптики методом ГТД и его производных (ОГД и т. д.) или методом ФТД обеспечивает полное

[1] RUZE, J. [April 1966] Antenna tolerance theory – A Review. *Proc. IEEE*, Vol. 54, **4**, p. 633-640.

описание диаграмм направленности антенны во всех направлениях, включая широкое угловое освещение и обратное излучение.

В некоторых случаях, когда S можно привести к плоскости, используются метод анализа поля в апертуре вместе с методом ГТД. Метод ГТД на основе дифрагированных лучей добавлен, чтобы охватить конечную поверхность A, где A выбирается таким образом, чтобы F спадала к пренебрежимо малому значению по ее границе. Результатом этого является гладкая и непрерывная функция F по всей плоскости P, а планарное интегрирование быстро дает диаграмму по всей передней полусфере. Если A значительно больше нормальной проекции A' антенны источника на P, то этот метод не работает, поскольку фазовая вариация F за пределами A' быстро возрастает по мере продвижения от ее границы. Если периферия рефлектора плоская, тогда A может быть выбрана как покрытие рефлектора.

Избыточное излучение облучателя за рефлектором может быть учтено путем прямой суперпозиции полей, хотя для обеспечения точной модели вблизи границы тени требуется также метод ГТД. Затенение субрефлектором или облучателем может быть учтено как тень или проецируемая тень на поверхность главного рефлектора. Метод IFR может использоваться для оценки вклада стоек. Метод сводится к измерению значений или каноническим задачам, которые могут быть решены приблизительно или точно, но может потребоваться дополнительная работа для определения диаграммы направленности излучения стойки конкретной установки. Однако приемлемую оценку уровней рассеивания стойкой, которое обычно происходит под значительным углом от линии прицеливания (в зависимости от геометрии стойки), могут дать общие аппроксимации, и такая оценка может быть достаточной для большинства целей. Метод интегрирования физической оптики может учитывать деформацию рефлектора или рассогласование облучателя/субрефлектора. Профиль рефлектора может быть определен экспериментально путем измерений или механического анализа. Микроволновая голография, базовые измерения с помощью теодолита и фотограмметрия являются диагностическими методами, которые также могут использоваться для оценки механического состояния поверхности рефлектора и связанных с ним систем, например размещения облучателя и субрефлектора, как это описано в Приложении 2.

Во многих системах рефлектор находится в ближнем поле облучателя или субрефлектора. Это требует точной оценки диаграмм ближнего поля облучателя или облучателя + рефлектора. Подходящими методами могут быть метод моментов и гибрид методов моментов и ГТД.

Комбинация интегрирования физической оптики с ОТД и ФТД является рекомендуемым инструментом анализа для прогнозирования диаграмм излучения больших рефлекторных антенн. Истинный профиль рефлекторов может быть получен с помощью диагностических методов, таких как голография или фотограмметрия.

В зависимости от конкретных особенностей рассматриваемой установки необходимо также принимать во внимание воздействие среды, в которой работает антенна. Влияние обтекателя антенны, отражение от почвы и окружающих строений – это факторы, которые должны быть приняты во внимание. В силу очевидной сложности структуры среды, окружающей составную антенну, рекомендуется использовать простейшие возможные методы. Являясь таковым, лучевой метод, как правило, представляется единственным практическим подходом к оценке взаимодействия большой антенны с окружающей средой, в которой она находится.

Эти рекомендации в обобщенном виде представлены на рисунке 1 и в таблице 1. Диаграмма направленности излучения большого рефлектора разделена на четыре сектора:

Сектор I: Передний аксиальный сектор.

Сектор II: Дальние боковые лепестки.

Сектор III: Задние лепестки.

Сектор IV: Задний аксиальный сектор.

Основные механизмы и рекомендуемые методы анализа приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Механизмы и методы анализа больших рефлекторов

	Основные механизмы	Методы анализа
Сектор I Передний аксиальный сектор	Эффективность облучателя/субрефлектора – Полная антенная конфигурация – Юстировка рефлектора/облучателя – Искажения рефлектора	ФО
Сектор II Дальние боковые лепестки	– Эффективность облучателя/субрефлектора – Полная антенная конфигурация – Искажения рефлектора – Стойки	ГТД/ОТД и IFR
Сектор III Задние лепестки	– Краевая дифракция рефлектора	ГТД/ОТД
Сектор IV Задний аксиальный сектор	– Освещение края рефлектора – Краевая геометрия рефлектора	Эквивалентные краевые токи

Приложение 2

Анализ с использованием экспериментальных данных

1 Введение

Наряду с использованием в качестве основы чисто теоретических методов, оценить диаграмму излучения антенны радиотелескопа возможно при обработке промежуточных, полученных экспериментальным путем, данных. В рассматриваемых в данном документе методах используются экспериментальные данные, связанные с:

– зондированием ближнего поля;

– микроволновой голографией;

– измерениями с помощью теодолита;

– фотограмметрией.

Каждый из этих методов описан ниже. Наиболее подходящий метод для любого применения определяется конкретными обстоятельствами каждого случая, вследствие чего невозможно дать общую рекомендацию.

2 Измерения ближнего поля

Теоретическая основа измерений ближнего поля базируется на теореме замкнутой поверхности, представленной в форме уравнения (4). Единственное различие заключается в том, что символ A используется для описания полной поверхности S. Можно видеть, что при известных тангенциальных полях по поверхности, которая замыкает антенну, диаграмма излучения антенны может быть определена во всем пространстве. Однако при этом для оценки поверхностных полей используются по большей части непосредственные измерения, а не какой-либо теоретический метод.

Зондирование планарного ближнего поля может использоваться для оценки излучаемых полей большей части полусферы. С другой стороны, метрология цилиндрического и, что более важно, сферического ближнего поля может обеспечить диаграммы для направлений в пределах почти всей или всей сферы излучения.

Для таких форм канонической геометрии диаграмма излучения может рассчитываться путем интегрирования или суммирования простейших составляющих плоской волны, цилиндрических или сферических гармоник. Существуют численные алгоритмы, которые могут обеспечить весьма эффективное выполнение всех необходимых арифметических операций. Однако проблемы, связанные с применимостью метрологии ближнего поля для определения диаграмм излучения антенн, используемых в радиоастрономии или для космических исследований, обусловливаются большими объемами требуемых данных ближнего поля, а также практическими сложностями, которые возникают при получении этих данных достоверным способом. Объем данных ближнего поля, необходимых для точного определения диаграммы направленности, определяется требуемым интервалом дискретизации. В случае планарного сканирования этот интервал дискретизации должен составлять $\lambda/2$ или менее. Для случая цилиндрического сканирования расстояние дискретизации по оси цилиндра должно составлять $\lambda/2$ или менее, а угловой интервал дискретизации по круговому поперечному сечению должен составлять $\lambda/(2R)$ (рад) или меньше, где R – радиус огибающей цилиндрической поверхности. Аналогично, для сферического сканера ближнего поля угловые интервалы дискретизации по азимуту и углу места не должны превышать $\lambda/(2R)$ рад.

Из этих выборочных значений может быть выведено, что для обычной антенны, применяемой в радиоастрономии или для космических исследований, объем требуемых данных ближнего поля является чрезвычайно большим. Кроме того, имеются существенные механические, электрические и финансовые сложности, связанные с созданием подходящих условий для сбора реальных данных ближнего поля. Эти сложности включают жесткие требования к механической точности положений зонда, когда он перемещается на большие расстояния, необходимые для дискретизации поля антенны. Кроме того, источник РЧ и метрологическое оборудование должны быть достаточно устойчивыми (или их изменения следует надежно компенсировать) в течение длительного периода времени сбора данных. Условия окружающей среды могут оказывать сильное влияние на результаты измерений ближнего поля, которые в силу практических соображений должны выполняться в открытом пространстве.

По всем этим причинам полное определение ближнего поля диаграмм направленности антенн, используемых в радиоастрономии и для космических исследований, не может рассматриваться как серьезное практическое предложение. С другой стороны, зондирование ближнего поля может использоваться для оценки излучающих свойств важнейших подсистем антенны, таких как облучатель, компактно размещаемые облучатель-субрефлектор, если таковое используется, питающие подсистемы лучевого волновода. Эти измеренные параметры могут использоваться в ФО или в методе типа ГО + ГТД для анализа характеристик антенны.

3 Микроволновая голография

Микроволновая голография включает измерение эффективности излучения антенны. Должны быть выполнены чрезвычайно сложные измерения, по результатам которых определяется состояние профилей рефлектора телескопа и его юстировки. Голография может использоваться для определения местоположения и величины поверхностных нарушений. Дополнительная информация, которую возможно получить по результатам голографического процесса, может касаться вероятного смещения облучателя относительно номинальной фокусной позиции. Голографический процесс достигает этих целей тогда, когда определяется точное изображение *фазовой вариации* поля в апертуре антенны. Как только это выполнено, можно использовать трассировку лучей, для того чтобы интерпретировать апертурную фазовую вариацию как информацию о профиле поверхности.

Голографический процесс начинается с регистрации диаграммы направленности не только по амплитуде, но также и по фазе. Для того чтобы могла быть зарегистрирована надежная фазовая информация, обычно используется вторая (эталонная) антенна, которая остается стационарной в течение процесса измерения. Диаграмма регистрируется тогда, когда отдаленный или близкий источник освещает антенну. В последнем случае полученное апертурное фазовое распределение должно быть исправлено на квадратичную погрешность фазы, которая является следствием неадекватного разделения между антенной и источником.

Фактические используемые источники могут быть расположены в земной среде, могут находиться на борту геостационарного спутника или могут быть даже космическими источниками микроволнового излучения. Последние два типа являются очень полезными для антенной голографии, поскольку они позволяют выполнять измерения диаграммы направленности при углах места, подобных тем, которые используются в реальной работе антенн космического исследования или радиоастрономии.

Следовательно, гравитационные эффекты искажения будут иметь намного более репрезентативные значения, чем в том случае, когда используется земной источник освещения. Голография, основанная на размещенных на борту космического аппарата источниках, дает преимущество перед использованием космических источников в том смысле, что измерение может быть выполнено с достаточно большим значением соотношения сигнал/шум. Однако для этого необходимо использовать алгоритмы, которые компенсируют движения спутника в течение периода измерения, и обычно для этого требуются специальные приемники.

Как только диаграмма направленности излучения зарегистрирована, используются соотношения преобразования Фурье для получения поля в апертуре. Согласно теореме о выборке диаграмма направленности излучения должна быть записана в дискретных направлениях с интервалом дискретизации δ_{UV} в пространстве U-V ($U = \sin\theta\cos\varphi$, $V = \sin\theta\sin\varphi$), так что:

$$\delta_{UV} \leq \lambda/D, \tag{17}$$

где D – диаметр антенны. Может применяться теория преобразования Фурье для доказательства того, что при использовании антенной решетки $N \times N$ для измерения в пространстве U-V апертурное распределение может быть восстановлено с разрешением пиксела, имеющим размеры:

$$\delta_{XY} = \frac{\lambda}{N\delta_{UV}}. \tag{18}$$

Восстановленные амплитудное и фазовое значения для пиксела представляют собой средние значения для реальных полей, которые существуют в соответствующей области. Это результат эффектов типа свертки, вследствие того что регистрируется и далее обрабатывается только ограниченная часть полной диаграммы направленности излучения. В этом смысле голография может обеспечить регистрацию *локальных средних чисел*, а не регистрацию точечной информации для профиля антенной поверхности.

Полиномиальная аппроксимация апертурной фазовой информации может восстанавливать детерминированные ошибки типа гравитационного и глобального теплового искажений, аберрации из-за осевого и бокового смещения облучателя. Если вычесть все эти факторы, тогда остаток может быть приписан псевдослучайной деформации профиля поверхности. Эти случайные деформации относят, как правило, в первую очередь, на производственный процесс, а если используются панели, то и на нарушение их упорядоченного расположения. В последнем случае эти восстановленные поверхностные данные могут использоваться для улучшения состояния юстировки панелей, которые формируют поверхность рефлектора. В любом случае, статистические свойства антенной поверхности обычно описываются значением σ, которое является среднеквадратичной величиной поверхностного отклонения от указанного (обычно параболического) профиля рефлектора. Значение σ, которое может быть однозначно определено из голографического процесса, зависит от ряда коэффициентов, включая рабочую длину волны, соотношение сигнал/шум, размер записи измеренной диаграммы, фазовую нестабильность систем приема и т. д. Практические измерения показали, что самые высокие достижимые значения D/σ, которые могут быть надежно измерены, имеют порядок ~ 250 000.

После получения голографической информации об антенне можно вывести аналитические выражения для поверхности рефлектора с использованием сплайн–функций интерполяции, полиномов Зернике и т. д. В этом, прежде всего, состоит значение голографии как инструмента прогнозирования диаграмм направленности. Аналитическое описание поверхности может теперь использоваться вместе с любым методом типа ФО, ФО + ФТД или ГО + ГТД для обеспечения данных диаграммы направленности излучения по угловым секторам, не охваченным в первоначальном голографическом сборе данных, или для частот, отличающихся от тех, которые использовались в голографическом процессе. Из-за явлений свертки, упомянутых ранее, некоторая информация относительно поверхностной вариации профиля неизбежно теряется. Это означает, что используемое описание поверхности не может быть полностью корректным. Следовательно, может существовать некоторая неоднозначность относительно точности прогноза уровня дальних боковых лепестков. Однако эта ситуация возможно не столь плоха, так как описание дальних боковых лепестков также сильно подвержено влиянию точности, с которой геометрия периферии рефлектора и связанное с этим облучение воспроизводится в теоретической модели.

Однако голографический подход не может быть полностью успешным при получении информации о профиле поверхности, когда рассматривается многорефлекторная антенна. В этом случае не вполне ясно, как правильно и однозначно связывать найденную апертурную фазовую информацию с детерминированными или случайными погрешностями профиля главного рефлектора или субрефлектора(ов).

Как следует из вышесказанного, потребности в микроволновой голографии обычно не возникает, если единственное требование – оценка характеристик антенны РЧ, а не поиск погрешностей профиля, вызывающих ухудшение рабочих характеристик. Однако этот метод может использоваться для измерения антенны в промежуточном диапазоне и вывода значения дальнего поля.

4 Измерения с помощью теодолита

Измерения с помощью теодолита, так же как методы фотограмметрии, описанные ниже, являются подходами на основе оптики, в которых используется геометрический характер оптического распространения для определения геометрических координат, выбранных пунктов (целей). Эти цели могут быть установлены на поверхности главного рефлектора, субрефлектора, на структуре поддержки, на стойках или даже на первичном облучателе антенны.

Теодолит – прибор, который, когда он направлен на цель, в основном измеряет два угла – один угол места и один азимут. Существуют два варианта теодолитных измерений, которые могут быть произведены:

– метод с использование теодолита и ленты;

– многотеодолитная станция, триангуляция.

Метод с использованием теодолита и ленты дает координаты точки в системе координат, связанной с теодолитом. Прибор непосредственно определяет два угла в полярных координатах цели. Радиальное расстояние до цели от контрольной точки теодолита может быть измерено или стальной лентой, или более точно – лазерным измерителем.

Предполагается, что система теодолит и лента должна быть откалибрована до фактического начала измерений. Кроме того, по-видимому, существует потенциальная проблема в местоположениях незенита, поскольку гравитация влияет на оптический прибор при его наклоне (как это происходит на рефлекторе) и поэтому такой прибор должен быть разработан специально.

При триангуляции с помощью многотеодолитной станции измерения выполняются двумя или более (обычно от 2 до 4) приборами, помещенными в различные места перед антенной. На этой стадии регистрируются только угловые измерения. Можно установить универсальную систему координат так, чтобы прямоугольные координаты каждой цели могли быть выражены однозначно. Точное местоположение каждой теодолитной станции должно быть известно заранее. Это – фаза калибровки (которая всегда является первой задачей при выполнении измерений с помощью теодолита) и по существу заключается в наблюдении известных точек, таких как точки контрольной отметки, маркеры и т. д.

На точность измерения теодолитных систем, конечно, воздействует основная точность прибора.

В настоящее время высокоточные цифровые теодолиты могут давать значительно меньшие ошибки, равные приблизительно 0,5 секунды дуги. Это означает, что конечная точность измерения теодолита будет больше обусловлена точностью градуировочного процесса и в меньшей степени – непосредственно основной точностью измерения. Опыт реальных измерений, результаты которых выражаются в отношении D/σ, объясненном ранее, показал, что точность имеет порядок 120 000 для установки из двух теодолитов и 250 000 для установки из четырех теодолитов.

5 Фотограмметрия близкого расстояния

Фотограмметрия – процесс получения надежной геометрической информации об объекте по измерениям его фотографических изображений. Сначала множество целевых точек определяется на антенной структуре. Используя специализированные фотограмметрические камеры, антенна фотографируется с различных направлений так, чтобы данные точки были видны на нескольких фотографиях. Определяются координаторы x, y целевого изображения в системе координат фотографической пластины. При использовании "проективных уравнений" можно связывать координаты изображения данной точки с ее истинными трехмерными координатами, связанными с мировой системой. Набор проективных уравнений для всех точек на антенне и для каждой рассматриваемой фотографии формирует основу фотограмметрического процесса триангуляции.

Проективные уравнения для каждой целевой точки зависят от набора параметров (проективные параметры), которые являются постоянными для каждой отдельной фотографии. Определение этих констант – цель градуировочной фазы. Калибровка может быть выполнена по подобным линиям, таким же, которые использовались при базовых теодолитных измерениях, то есть путем анализа некоторого числа контрольных точек. Однако свойства фотограмметрии регистрировать несколько точек в пределах отдельной фотографии может допускать альтернативную процедуру калибровки, которая выполняется одновременно с фактическим определением позиции контрольных точек. В сущности, возможность регистрации данной цели на множестве фотографий ведет к созданию переопределенной системы, которая может быть решена методом наименьших квадратов. Этот подход позволяет получить проективные параметры через систему с меньшим числом уравнений. Координаты целевых точек впоследствии могут быть определены. Такой подход называется "методом пучка".

Между методами многотеодолитных систем и фотограмметрией имеется сходство, поскольку в рамках обоих методов используется триангуляция для установления координат цели. Однако имеется важное различие, в том смысле, что в фотограмметрии не требуется знать точную позицию измерительной станции. Эта точка может быть восстановлена по измерениям, поскольку пучок лучей, представляющих цели, экспонированные на фотографии, всегда считается стигматическим относительно позиции опорной станции.

Точность фотограмметрии увеличивается при увеличении числа фотографий, и фотограмметрия делает более простым рассмотрение большого количества точек в большем числе разных положений по сравнению с измерениями с помощью теодолита. Фотограмметрия также очень "быстра", что хорошо в том случае, если параметры изменяются во времени, как это обычно бывает. (Механические измерения на больших антеннах часто должны быть выполнены облачной ночью для установления постоянной температуры по антенне.) Эти преимущества в сочетании с эффективной процедурой калибровки, описанной выше, делают фотограмметрию более точным методом определения координат, чем метод с использованием теодолитов. Фотограмметрия обычно обеспечивает точное измерение D/σ порядка 250 000. При тщательном фотограмметрическом анализе большой антенной структуры полностью достижим порядок 500 000 или даже 1 000 000. Однако, поскольку в процессе измерений антенна, как правило, наклонена по углу места до почти горизонтали, могут быть внесены нерепрезентативные ухудшения, обусловленные гравитацией.

Так как при фотограмметрии возможен анализ большого числа точек, может быть найдено лучшее выражение поверхности основного рефлектора или субрефлектора антенны по сравнению с другими методами измерений. Обработка этих данных любым способом типа ФО или ГО + ГТД может обеспечить хорошую оценку диаграммы направленности излучения антенны в расширенном угловом секторе.

_____