

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН НА ТРОПОСФЕРНЫХ РАДИОЛИНИЯХ

Петров В.А., Шейко С.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина 14, каф. радиоэлектронных систем, тел. (057) 702-15-87

E-mail: res@kture.kharkov.ua

The transmitting antenna gain loss in the troposphere radio systems has been noticed by a number authors [1,2]. A reason of the loss is not quite clear. The phase structure of the scattered field as a possible reason of the transmitting antenna gain loss is examined in this work. It is shown that the scattered field contains the alternating component. There are a few antipodal signal allocated within the whole scattering volume. That is a possible reason of the transmitting antenna gain loss.

Введение. Известно, что в системах, использующих явление дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн (ДТР), увеличение коэффициента направленного действия (КНД) антенн не приводит к пропорциональному увеличению мощности сигнала. Такое суммарное снижение эффективности антенн, называемое потерями усиления, достигает 10...12 дБ [1]. Снижение эффективности приемных антенн связано с неоднородностью поля в плоскости апертуры и составляет около 5 дБ при КНД $G_2 \approx 30$ дБ [2,3]. Оценки снижения КНД передающих антенн G_1 по экспериментальным данным и интерпретация потерь усиления разными исследователями неоднозначны. Однако установлено, что при $G_1 \geq 30$ дБ средние потери составляют около 5 дБ и растут с увеличением G_1 . Есть основания считать, что снижение эффективности передающих антенн связано с некоторыми интегральными факторами, проявляющимися в рассеивающем объеме V конечных размеров. Выявление этих факторов существенно для рационального проектирования и повышения эффективности тропосферных линий передачи сигналов.

Цель работы состоит в оценке фазовых соотношений между вторичными волнами, рассеянными разными частями области V , в условиях ДТР из-за разности хода на пути от передающей до приемной антенны.

Задача состоит в оценке амплитуд и фаз сигналов, приходящих от области рассеяния радиоволн V под разными углами, по результатам экспериментального измерения диаграмм направленности приемной антенны [2] при ее вращении в горизонтальной плоскости.

1. Экспериментальные диаграммы направленности приемной антенны. В работе [2] приведены диаграммы направленности (ДН), полученные на трассе ДТР протяженностью 205 км при вращении приемной антенны с шириной ДН в горизонтальной плоскости $\theta_z \approx 0,7^\circ$. Прием сигналов осуществлялся антенной в виде усеченного параболоида вращения размером 2×10 м. На передающем конце трассы использовалась аналогичная антенна. При скоростях вращения 18 и 36 град./с период записи ДН составлял 10 или 20 с. Поэтому ряд последовательно записанных за 80 с диаграмм, искаженных флуктуациями диэлектрической проницаемости воздуха $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{фл.}$, соответствует малым изменениям среднего значения ε_0 в объеме V и разным реализациям (выборкам) флуктуирующей составляющей $\varepsilon_{фл.}$.

Максимумы принятого сигнала достигаются при таком положении передающей и приемной антенн, когда оси их ДН лежат в плоскости большого круга. Поскольку ширина ДН антенны в вертикальной плоскости $\theta_e \approx 3^\circ$, то при неподвижной передающей антенне и вращающейся приемной область рассеяния радиоволн V перемещается в пространстве по приблизительно параболической траектории над поверхностью Земли. Вершина параболы находится в плоскости большого круга на минимальном расстоянии к

передатчику. Такая ориентация антенн соответствует условиям ДТР и максимальному среднему уровню сигнала. На рис.1 (а,б) приведены заимствованные из [2] примеры записи сигналов на выходе приемника при вращении антенны, а на рис.2 – усредненные и нормированные данные для серии измерений, соответствующей относительно слабым флуктуациям ε (сплошная линия). В том же угловом масштабе на рис.2 показана нормированная ДН приемной антенны в свободном пространстве (штриховая линия).

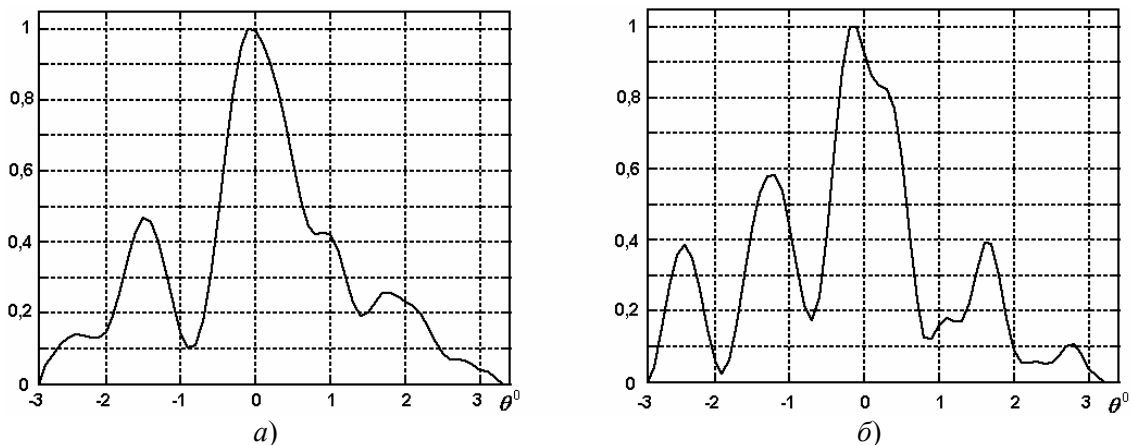


Рис. 1

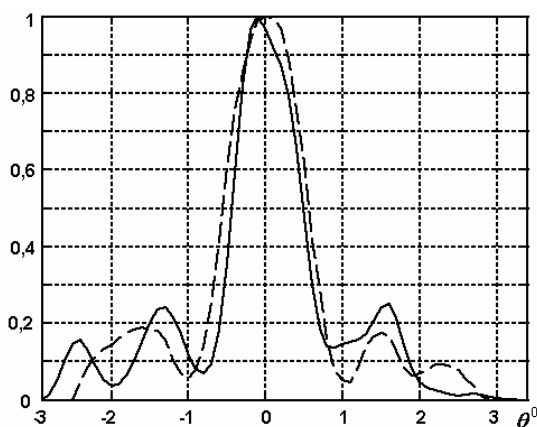


Рис. 2

Обращает на себя внимание тот факт, что ширина главного максимума усредненной ДН меньше ширины ДН в свободном пространстве, хотя усреднение диаграмм проводилось без совмещения главных максимумов. Поскольку в обоих случаях отклик приемника описывается сверткой пространственного распределения источников сигналов с импульсной реакцией приемной системы, сужение наблюдаемой ДН свидетельствует о наличии в пространственном распределении источников вторичных волн противофазных компонент.

2. Алгоритм и результаты дополнительной обработки экспериментальных данных. Исходя из физической интерпретации природы вторичных волн авторами теории рассеяния Букером и Гордоном [4] можно считать, что вторичное излучение при малых углах рассеяния порождается электрическими диполями, образованными крупномасштабными неоднородностями. Их максимальный масштаб ограничен размером области V , связанным с шириной ДН передающей антенны. Ориентация i -го дипольного момента p_i совпадает с направлением вектора электрического поля падающей волны E_0 . Поскольку диполи возбуждаются бегущей волной, разность фаз волн, приходящих в точку приема от разных частей объема V связана лишь с разностью хода, которая монотонно увеличивается с отклонением луча от плоскости большого круга и высотой над поверхностью Земли.

На трассе длиной 200 км горизонтальное отклонение направления прихода волны на $\sim 0,06^\circ$ изменяет фазу сигнала на π . Отклонение на $0,35^\circ$, т.е. на полуширину ДН, изменяет фазу волны на 6π . Очевидно, при разной ширине ДН в объеме V число зон Френеля различно, а суммарный эффект действия этих зон изменяется не монотонно. Это

может быть одной из причин большого разброса оценок потерь усиления передающих антенн в разных экспериментальных работах. В ходе дополнительной обработки данных работы [2] рассматривалась возможность синтеза одного из вероятных пространственных распределений $X(\theta)$ амплитуд источников вторичных волн, которая отвечала бы одновременно двум требованиям:

- свертка этого распределения с известной импульсной реакцией (ДН в свободном пространстве) отличается от экспериментальных диаграмм в среднеквадратичном не более, чем на конечную величину σ ,

- источники однополярны.

Как показано ниже, среди действительных функций отсутствуют решения, удовлетворяющие указанным требованиям.

Для синтеза решения использовался итерационный алгоритм Ван-Циттерта [5]. Суть алгоритма состоит в следующем. Вначале формируется произвольная гипотеза распределения источников. Свертка этого распределения с импульсной реакцией приемной части системы сравнивается с измеренной экспериментально диаграммой направленности и вносится коррекция в гипотезу. Такая процедура повторяется циклически заданное число раз N . Скорректированная N раз гипотеза и является искомым решением. Среднеквадратическая разность экспериментальных данных и вычисляемой свертки контролируется в каждом цикле итераций. В общем виде такая задача соответствует решению интегрального уравнения Фредгольма I рода и имеет точное решение при точно заданной правой части. Применение такого алгоритма к обработке экспериментальных данных приводит к неограниченно растущей ошибке, т.е. задача является некорректной по Тихонову А.Н. Решение таких задач существует, если ищется не точное решение, а одно из множества решений, отличающихся в среднеквадратичном на конечную величину. Для регуляризации решения задачи по Тихонову А.Н. применяются разные способы коррекции решений, которые, как правило, можно свести к эквивалентным операциям коррекции частотной характеристики инверсного фильтра. Известны также процедуры нелинейной обработки, корректирующие характеристику в каждом цикле итераций.

В нашем случае итерационный алгоритм Ван-Циттерта модифицирован введением нелинейной обработки спектра решения и экспоненциальным подавлением его высокочастотных составляющих. После модификации алгоритм сходится к одному из возможных решений при произвольном выборе первоначальной гипотезы.

Для ограничения классов функций, в которых ищется решение, дополнительной нелинейной операцией запрещались отрицательные значения решения. Многочисленными экспериментами установлено, что в этом случае достичь сходимости алгоритма с заданной допустимой ошибкой невозможно, т.е. среди однополярных функций регулярные в указанном смысле решения отсутствуют.

Если не вводится такое ограничение, то в классе знакопеременных функций эффективная сходимость достигается после 15...20 итераций. Устойчивость алгоритма к случайным ошибкам эксперимента проверялась увеличением числа итераций до $N = 300$. Даже при таком числе итераций среднеквадратическая ошибка σ монотонно уменьшается.

На рис.3 (а) показаны экспериментальная ДН (сплошная линия) и результат синтеза искомого распределения источников после 100 итераций (штриховая линия), а на рис.3 (б) – зависимость среднеквадратической ошибки σ от числа итераций N .

Решение интегрального уравнения свертки или уравнения Фредгольма I рода формально сводятся к инверсной фильтрации, что эквивалентно увеличению разрешающей способности системы путем сужения импульсной реакции (т.е. подъему высших составляющих спектра свертки). В нашем случае достигается увеличение разрешающей способности примерно в 2 раза. Дальнейшее повышение разрешающей способности ограничено недостаточно большим отношением сигнал/шум.

Существенной для анализа информативной частью приведенных графиков является интервал углов $(-1^\circ, +1^\circ)$. За пределами этого интервала сигналы на выходе приемника обусловлены вторичным излучением из тех частей пространства, которые не принадлежат области рассеяния V при ДТР.

Кроме знакопеременной части в этом интервале углов присутствует средняя составляющая, что согласуется с установленным экспериментально фактом наличия «когерентной» составляющей рассеянного сигнала в точке приема [1].

Синтезированное угловое распределение амплитуд источников (см. рис.3, а) вполне может соответствовать выборочному распределению диэлектрической проницаемости ϵ среды в реальной атмосфере.

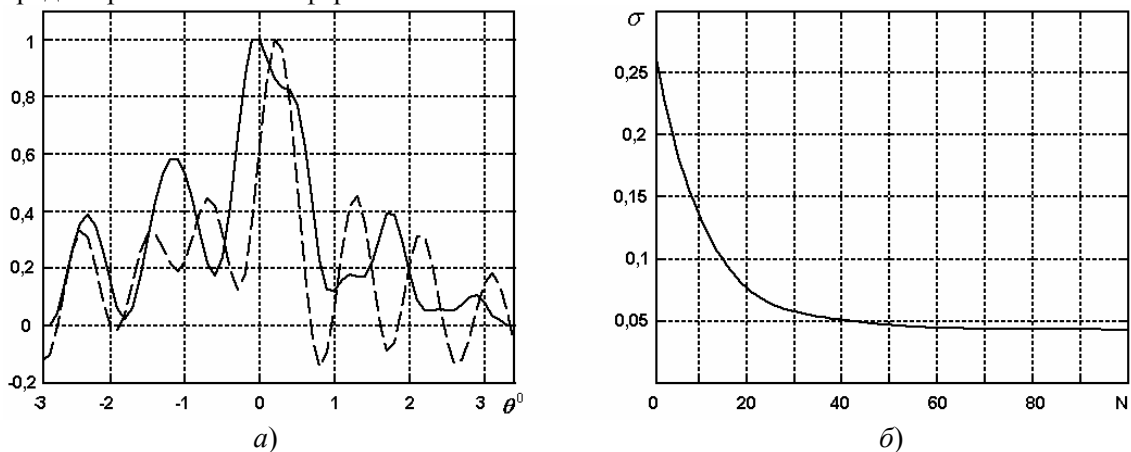


Рис. 3

Выводы. В пределах главного лепестка диаграммы направленности передающей антенны в объеме рассеяния существуют области противофазного излучения, сравнимые между собой по интенсивности. Количество зон противофазного излучения, находящихся в объеме рассеяния, связано с шириной диаграммы направленности передающей антенны, причем с уменьшением ширины ДН число зон уменьшается.

Суммарное действие излучений из этих зон в точке расположения приемной антенны приводит к снижению интенсивности поля в точке приема и формально выглядит как потери усиления передающей антенны, поскольку интервал корреляции рассеянного поля и потери усиления приемной антенны не меняются.

Зависимость потерь усиления от КНД передающей антенны не монотонная; может наблюдаться как уменьшение уровня принимаемого сигнала, так и его относительное увеличение. По-видимому по этой причине оценки потерь усиления передающих антенн в разных экспериментальных работах существенно различны.

Литература

1. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Под ред. Б.А. Введенского и др. М.: Сов. Радио. – 1965. – 418 с.
2. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. — 384 с.
3. Петров В.А., Шейко С.А. Потери усиления антенн в системах измерения профиля ветра // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 4. – С. 41-43.
4. Booker H.G., Gordon W.E. A Theory of Radio Scattering in the Troposphere // Proc. IRE, 38. – 1950, №4. – P. 401.
5. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Под ред. Т. Хуанга. М.: Мир. – 1979. – 318 с.