

УДК 621.391.81

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН ПРИ ДИФРАКЦИОННОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ УКВ

*П. Н. Дагуров, А. С. Заяханов, А. Е. Цыбиков, Н. Б. Чимитдоржиев*

Приводятся результаты исследования электромагнитного поля сантиметрового диапазона на входе направленной антенны при дифракционном многолучевом распространении. Отмечается, что форма диаграммы направленности приемной антенны в горизонтальной плоскости существенно зависит от расположения приемной точки на интерференционной структуре поля поперек трассы. Обсуждаются статистические характеристики флуктуаций мгновенных диаграмм направленности.

Дифракционное поле сантиметровых волн на приземных пересеченных трассах характеризуется сильной пространственной неоднородностью вследствие многолучевого распространения, обусловленного рассеянием на неровностях гребней экранирующих препятствий рельефа [1-3].

Известно, что при многолучевом распространении УКВ, вызывающем искажение фазового фронта волны, наблюдаются изменения диаграмм направленности антенн по сравнению с диаграммой в свободном пространстве [4-6]. На приземных дифракционных трассах многолучевость поля также приводит к искажениям диаграмм направленности по сравнению с диаграммой, полученной на прямой видимости. Эти искажения проявляются в расширении основного лепестка, в расщеплении его на несколько составляющих, появлении значительных по уровню боковых лепестков, отклонении направления главного максимума от направления на излучатель [7].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований флуктуаций диаграмм направленности в условиях дифракционной многолучевости. Для выяснения степени влияния естественных препятствий в виде гор или холмов на формирование диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости были проведены измерения на трассе 1 с одиночным препятствием в виде холмов правильной конусообразной формы и на трассе 2 с препятствием, имеющим неровный и протяженный поперек линии трассы гребень. Для первого случая проведены численные расчеты, которые сравниваются с результатами эксперимента.

**1. Методика измерений.** Продольные и поперечные профили трасс приведены на рис. 1. Исследования проведены в 10-сантиметровом диапазоне волн.

В качестве передающей и приемной антенн использовались параболические антенны, ширина диаграммы направленности которых, измеренная на прямой видимости, составляла соответственно  $4^\circ$  и  $2^\circ,5$  в азимутальной плоскости по уровню — 3 дБ. Уровень боковых лепестков не превышал — 20 дБ. Пространственная неоднородность поля поперек трассы распространения в месте измерений определялась с помощью слабонаправленной рупорной антенны с шириной диаграммы направленности  $25^\circ$ .

Приемные антенны находились на высоте 3 м от поверхности Земли, передающая — 5 м. В ходе эксперимента изучались следующие характеристики поля в тени препятствий: пространственное распределение поля, искажения диаграмм направленности приемных антенн в зависимости от местоположения антенны на интерференционной пространственной структуре и флуктуации углов прихода радиоволн. Под диаграммой направленности приемной антенны в данном случае понимается угловая зависимость уровня принимаемой мощности при сканировании антенн в горизонтальной плоскости. При исследовании временных флуктуаций диаграмм направленности анализировались смещения максимума мгновенных диаграмм за сеанс и весь период наблюдений. Цикл одного сеанса измерений составлял обычно 15—20 мин, за который получали десять мгновенных диаграмм. Продолжительность измерения одной мгновенной диаграммы составляла 3—6 с в зависимости от степени расширения главного лепестка диаграммы. В процессе статистической обработки определялись средние диаграммы направленности с учетом отклонения направления главного максимума относительно направления на источник и средние диаграммы при совмещении мгновенных диаграмм направленности по главным максимумам. Сопоставление таких диаграмм позволяет оценить вклад в расширение средней диаграммы, который по отдельности вносят расширение каждой реализации и отклонения направлений главного максимума [5]. Также проводилась статистическая оценка ширины диаграммы направленности по уровню — 10 дБ [8] и оценивались флуктуации углов прихода главного лепестка диаграммы по максимальному уровню сигнала и по смещению направления, соответствующему середине мгновенной диаграммы на уровне — 10 дБ, от направления на источник излучения.

Для оценки влияния отражений от земной поверхности на формирование пространственной структуры поля и диаграмм направленности были проведены измерения на участках прямой видимости между гребнями препятствий и приемными пунктами при установке передатчика на вершину препятствия. Эти измерения показали, что пространственная неоднородность поля на открытой трассе была выражена слабо (колебания уровня сигнала поперек трассы не превышали 2—4 дБ), а диаграммы направленности были практически одинаковы в разных точках пространственного распределения. Таким образом, можно сделать вывод, что определяющее влияние на формирование пространственной интерференционной структуры поля в горизонтальной плоскости и деформацию диаграммы оказывают неровности гребня препятствия, приводящие к многолучевости и искажению фронта волны [1—3, 7, 9, 10]. Отметим, что на открытых трассах с неоднородной поверхностью раздела может наблюдаться заметная пространственная неоднородность поля в горизонтальной плоскости с лепестковой структурой таких характеристик сигнала, как средний уровень поля, относительные флуктуации амплитуды сигнала и их пространственная корреляция, причем колебания среднего уровня на волне 10 см достигают 20 дБ с квази-периодами единицы метров [11, 12].

**2. Пространственные искажения диаграмм направленности антенн.** Измерения диаграмм направленности антенн в тени препятствий обнаруживают сложную зависимость формы диаграммы от поперечного профиля препятствий и местоположения антенны. Основной причиной искажений диаграмм направленности антенн является дифракционная многолучевость. Многолучевая структура дифракционного поля, проявляющаяся в появлении областей с максимумами и минимумами уровня поля  $P$  (рис. 1), приводит к значительным искажениям диаграмм направленности по сравнению с диаграммой на участке прямой види-

мости. На рис. 2а для примера показаны измеренные диаграммы направленности, полученные в различных точках пространственной структуры поля на этих трассах, обозначенных на рис. 1 как  $A_1$ ,  $A_2$  и т. д. За нулевое направление принято истинное направление на излучатель.

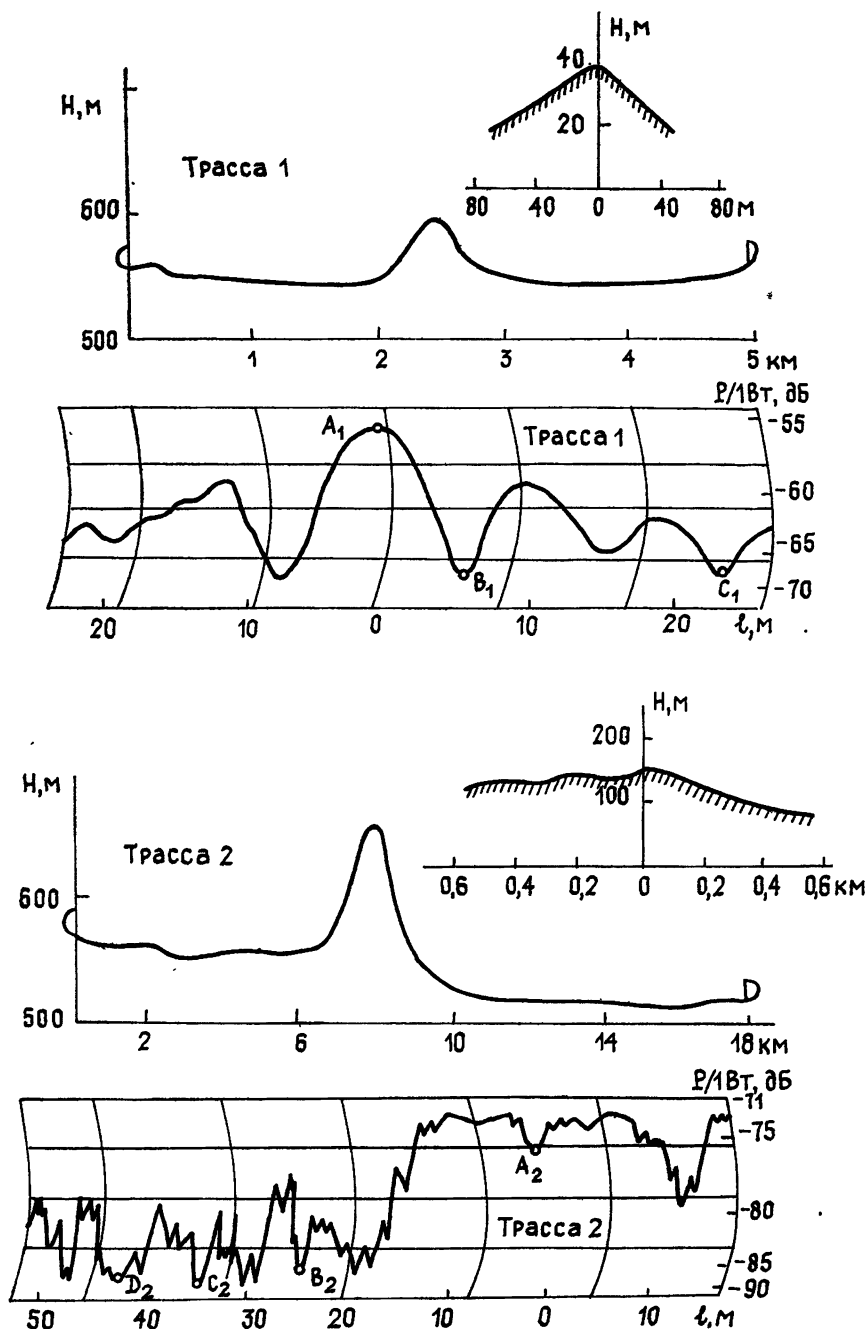
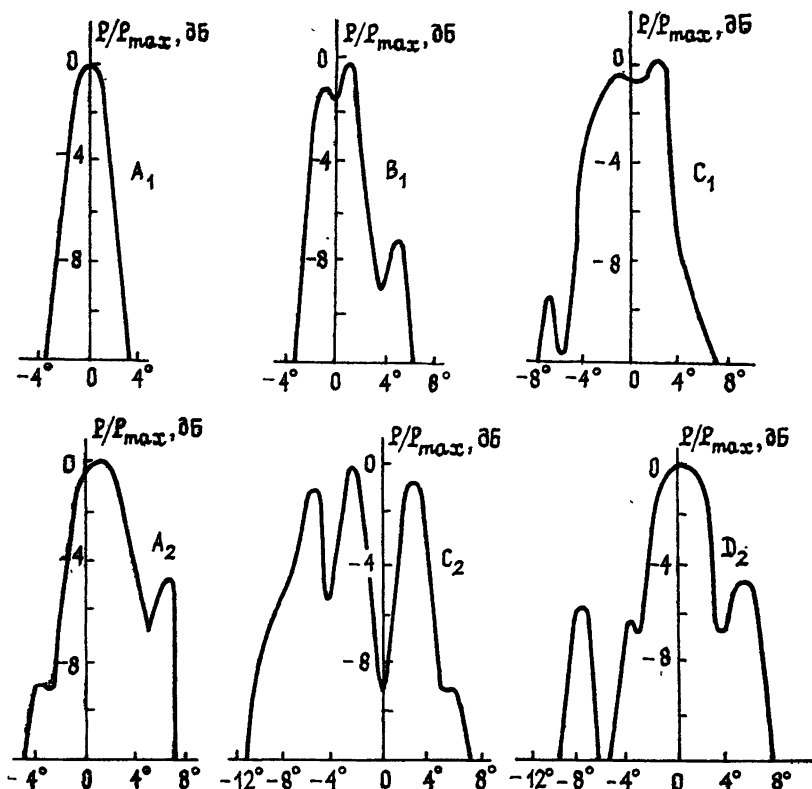


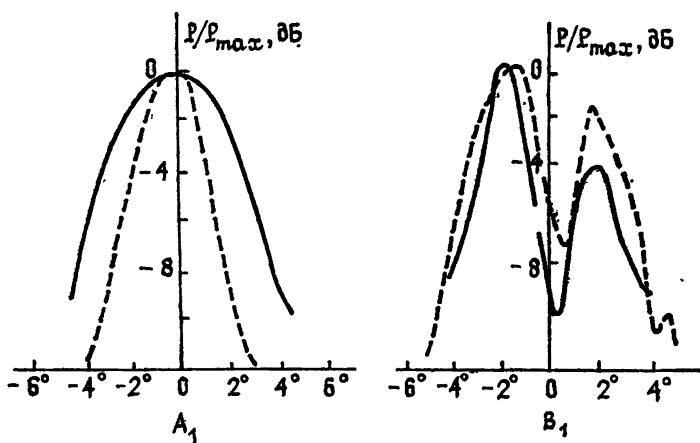
Рис. 1.

Из приведенных диаграмм видно, что в максимумах интерференционной структуры (кривые  $A_1$ ,  $A_2$ ) проявляется один основной лепесток диаграммы, но с большей шириной, чем ширина диаграммы на-

правленности, полученной на прямой видимости. Диаграммы, снятые вблизи минимумов пространственного распределения (кривые  $B_1, C_1, C_2, D_2$ ) искажены сильнее — основной лепесток здесь расщепляется на два или большее количество соизмеримых по уровню лепестков.



а)



б)

Рис. 2.

Таким образом, степень деформации диаграммы направленности зависит от месторасположения приемной антенны на пространственной интерференционной картине в горизонтальной плоскости, образующейся вследствие многолучевости дифракционного поля.

Сравнение диаграмм, полученных в различных точках пространственного распределения поля, показывает на наличие систематического отклонения направления главного максимума диаграммы от направления на источник. В интерференционных минимумах пространственной структуры поля систематические ошибки пеленга существенно больше, чем в его максимумах.

В минимумах дифракционные лучи, распространяющиеся вблизи створа (геометрической линии трассы), интерферируют в противофазе, и большую роль начинает играть переизлучение с участков гребня, расположенных в стороне от створа трассы.

О систематических отклонениях направления главного максимума можно судить по измерениям в дневные часы, когда форма диаграммы, как правило, стабильна и положение главного максимума во времени не изменяется. Измеренные значения систематических ошибок пеленга по направлению главного максимума диаграммы направленности достигали  $3^\circ$  на трассе 1 и  $6^\circ$  на трассе 2.

На рис. 2б приведены расчетные диаграммы направленности, полученные в интерференционном максимуме и минимуме пространственного распределения поля в месте приема на трассе 1. Здесь же пунктирными линиями нанесены измеренные диаграммы в точках  $A_1$  и  $B_1$  горизонтального поперечного разреза.

Численные расчеты проведены в приближении Кирхгофа—Френеля, при этом профиль препятствия аппроксимировался треугольником с соответствующими параметрами, а диаграмма направленности приемной антенны с  $\theta_0 = 2^\circ,5$  — гауссовой кривой ( $\theta_0$  — ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости на уровне половинной мощности).

Вычисление проводилось методом кусочно-постоянной аппроксимации и полное поле представлялось как векторная сумма полей от отдельных острых прямоугольных краев. Небольшое расхождение экспериментальных и расчетных диаграмм, по-видимому, объясняется сильной критичностью искажений главного лепестка диаграммы направленности от расположения приемной антенны в месте приема и недостаточно точной аппроксимацией формы профиля препятствия.

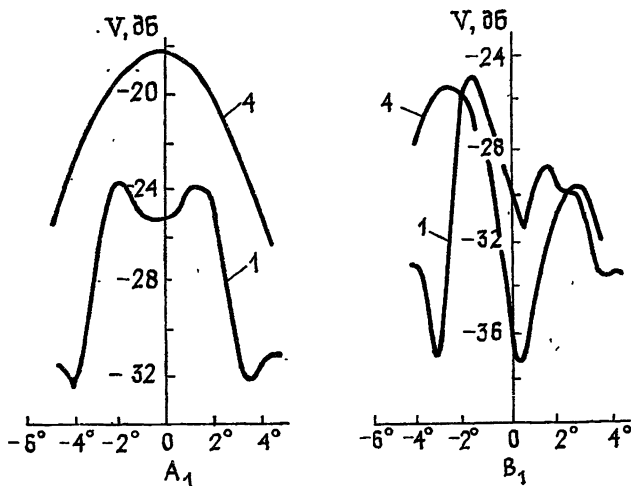


Рис. 3.

На рис. 3 для сравнения показаны расчетные диаграммы направленности приемных антенн с  $\theta_0 = 1^\circ$  и  $\theta_0 = 4^\circ$  на этой же трассе. Полученные данные подтверждают результаты [2], указывающие на ха-

ракетное для дифракционно-рассеянного сигнала явление потерь усиления антенн. Например, если для антенны с шириной диаграммы  $\theta_0=4^\circ$  множитель ослабления в интерференционном максимуме пространственной структуры поля составил  $V=-18$  дБ, то при  $\theta_0=1^\circ$  в максимуме диаграммы направленности  $V=-24$  дБ. Более сложная зависимость отмечается в минимуме пространственного распределения поля. Для ненаправленной антенны множитель ослабления в этой точке равен  $-33$  дБ. При ориентации направленных антенн по максимуму сигнала для обеих антенн наблюдается «выигрыш усиления», а при ориентации их по линии трассы для антенны с  $\theta_0=4^\circ$  имеем потери усиления, тогда как для антенны с  $\theta_0=1^\circ$  отмечается «выигрыш усиления».

Характерно, что на данной трассе с уменьшением ширины диаграммы направленности антенны появляются систематические ошибки пеленга в максимумах интерференционной структуры дифракционного поля.

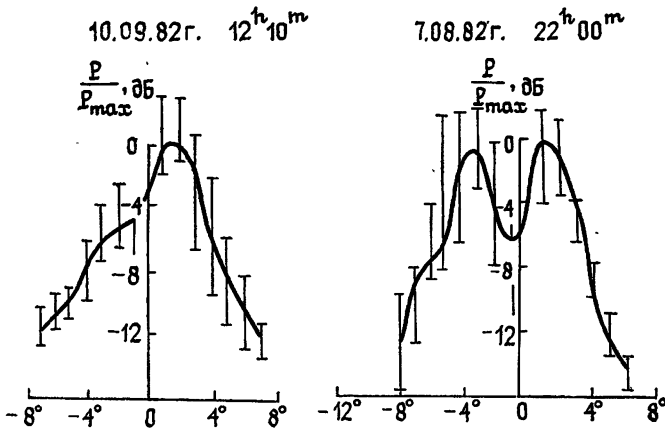


Рис. 4.

### 3. Временные флуктуации диаграмм направленности антенн.

Временные флуктуации диаграмм обычно связаны с изменением условий рефракции, причем наряду с медленными суточными изменениями углов прихода наблюдаются быстрые флуктуации с характерным периодом изменения от секунд до нескольких минут, обусловленные турбулентностью приземного слоя тропосферы. На рис. 4 приведены средние диаграммы за сеанс, где по ординате отложены значения верхнего и нижнего пределов флуктуаций огибающей в соответствующих направлениях. На рис. 5 (сплошная кривая 1) приведена усредненная диаграмма направленности, построенная по двадцати двум сеансам измерений мгновенных диаграмм. Нормировка диаграмм производилась по уровню главного максимума средних за сеанс диаграмм направленности. Из рисунка видно, что на данной трассе доминируют в основном два луча, которые приводят к значительному расширению диаграмм направленности приемной антенны.

Из зависимости дисперсии флуктуаций уровня поля  $\sigma^2$  от ориентации антенны (сплошная кривая 2 на рис. 5) видно, что интенсивность флуктуаций на несловных направлениях достигает значительных величин. Это связано с флуктуациями углов прихода регулярных лучей и образованием дополнительных боковых излучений от дальних участков гребня, вызванных изменением условий рефракции.

На рис. 6 (кривая 1) приведено интегральное распределение углов прихода радиоволн  $\varphi$  в пункте  $B_2$ , построенное по 280 реализациям. Значение  $\varphi=0$  соответствует направлению на источник. Из рисунка видно, что флуктуации углов прихода в отдельные моменты времени могут быть достаточно значительными. Эти флуктуации, как правило,

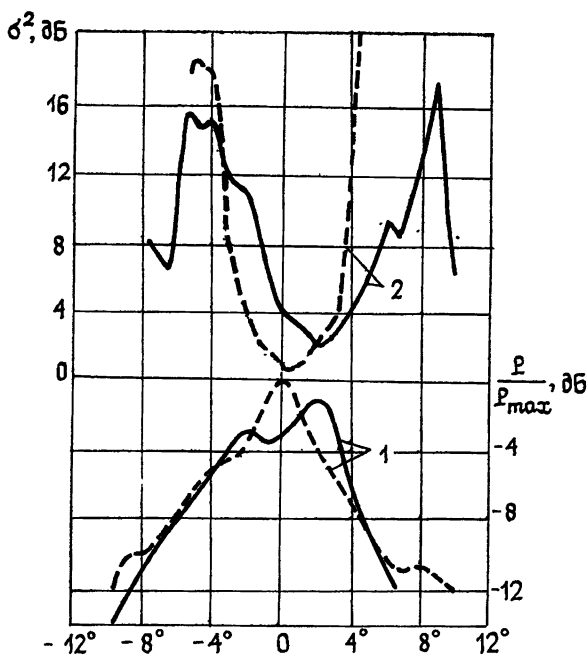


Рис. 5.

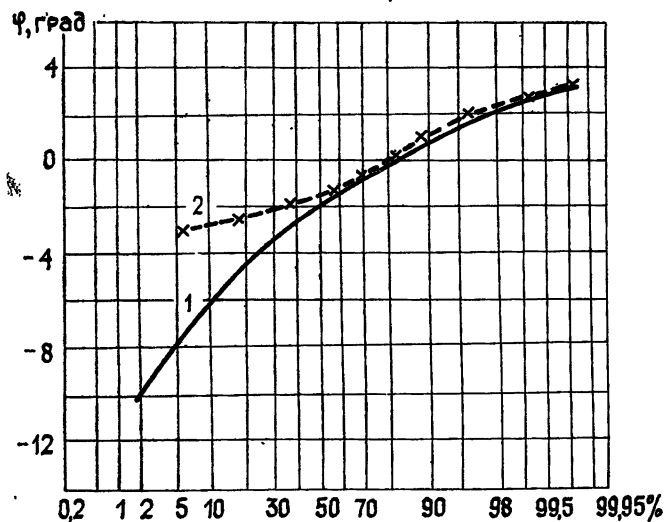


Рис. 6.

определяются медленными колебаниями углов прихода, связанными с изменением условий рефракции, которые вызывают изменения амплитуд и фаз интерферирующих дифракционных лучей в месте приема.

При анализе флуктуаций направления главного максимума мгновенных диаграмм учитывались смещения точки максимального уровня

принимаемого поля в горизонтальной плоскости. Иногда при распылении главного лепестка максимум выражен слабо. Поэтому для сравнения на рис. 6 (кривая 2) приведено интегральное распределение флуктуаций середины диаграммы (на уровне — 10 дБ) от нулевого направления, построенное по 200 реализациям мгновенных диаграмм. Сравнение кривых показывает, что распределения заметно различаются. Флуктуации луча, построенные по смещению середины диаграммы, оказываются меньшими.

Статистическая оценка ширины диаграммы направленности на уровне — 10 дБ показала, что средняя ширина диаграммы на этом уровне увеличилась от значения 6°,2 для прямой видимости до 12°,9, т. е. более чем в два раза.

На рис. 5 (пунктирная кривая 1) приведена «средняя» диаграмма без учета отклонения направления главного максимума, т. е. когда при наложении мгновенных диаграмм совмещались направления главных максимумов. Сравнение данной диаграммы с диаграммой, полученной усреднением мгновенных диаграмм при совпадении азимутальных меток (сплошная кривая 1), показывает на расширение последней за счет отклонений главного максимума.

Из зависимости дисперсии относительных флуктуаций уровня принимаемой мощности от направления антенны (пунктирная кривая 2) видно, что в направлении главного максимума интенсивность флуктуаций убывает быстрее, чем для такой же интенсивности, полученной при совпадении азимутальных меток.

Анализ экспериментальных данных и расчетных оценок влияния препятствий различной геометрической формы на формирование диаграмм направленности антенны показывает:

1. Диаграмма направленности антенны, расположенной в геометрической тени естественных препятствий, претерпевает значительную пространственную деформацию. Эти искажения зависят от степени пространственной неоднородности поля в месте приема. Сравнение расчетных значений пространственных флуктуаций поля и диаграмм направленности антенн в горизонтальной плоскости удовлетворительно согласуется с результатами измерений.

2. На дифракционных трассах при многолучевом распространении, обусловленном рассеянием на неровностях гребней препятствий, наблюдаются значительные пространственно-временные флуктуации углов прихода, проявляющиеся в отклонении главного максимума диаграммы направленности антенн от направления на источник. Суточные изменения состояния атмосферы, вызывающие рефракционные замирания сигнала, приводят к изменению лепестковой структуры диаграммы, а быстрые замирания сигнала, обусловленные турбулентностью тропосферы, вызывают флуктуации амплитуды отдельных лучей. Флуктуации направления главного максимума вносят определяющий вклад в расширение средней диаграммы направленности.

3. Одним из возможных методов уменьшения ошибок местоопределения источника излучений на пересеченных трассах является усреднение диаграмм направленности и отсчитывание значений пеленга по центру тяжести диаграммы антенны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бараповский Г. А., Немировский А. С., Троицкий В. Н., Цемехман В. М. — Электросвязь, 1976, № 7, с. 29.
2. Троицкий В. Н. В кн.: Распространение радиоволн. — М.: Наука, 1975, с. 154.
3. Дагуров П. Н., Цыбиков А. Е., Чимитдоржиев Н. Б. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 2, с. 163.
4. Андрианов В. А., Арманд Н. А., Ракитин Б. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1974, 17, № 10, с. 1478.



5. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. — М.: Сов. радио, 1970.
6. Дальнее тропосферное распространение УКВ. / Под ред. Б. А. Введенского и др. — М.: Сов. радио, 1965.
7. Дагуров П. Н., Заяханов А. С., Цыбиков А. Е., Чимитдоржиев Н. Б. Тезисы докладов Межведомственного совещания по распространению ультракоротких радиоволн и электромагнитной совместимости. — Улан-Удэ, 1983, с. 175.
8. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. — М.: Сов. радио, 1977, т. 1.
9. Assis S. — Radio Sci., 1982, 17, № 5, p. 1051.
10. Осимуга Y., Насамуга S. — Rev. Electr. Commun. Lab., 1965, 13, № 3—4, p. 183.
11. Филипп Н. Д. — Радиотехника и электроника, 1961, 6, № 9, с. 1432.
12. Семенов А. А., Арсеньян Т. И. Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах. — М.: Наука, 1978.

Институт естественных наук  
Бурятского филиала  
СО АН СССР

Поступила в редакцию  
22 ноября 1984 г.

## SPACE-TIME FLUCTUATION AT ANTENNA PATTERN AT THE MICROWAVE DIFFRACTION PROPAGATION

*P. N. Dagurov, A. S. Zayakhanov, A. E. Tsybikov, N. B. Chimitdorzhiev*

The results of investigation of electromagnetic field of centimeter waves by highly directional antenna are presented. An important dependence of horizontal plane pattern of the receiving antenna from the position of the receiving point on the interference structure of field across the path is noted. Statistical characteristics of fluctuations of instantaneous patterns are discussed.

## ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

Аникиев Ю. Г., Жаботинский М. Е., Кравченко В. Б. Лазеры на неорганических жидкостях. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. — 18 л.

Дано систематическое изложение теории и применений лазеров на неорганических жидкостях, позволяющих получать предельно высокую импульсную и среднюю мощности когерентного излучения на длине волны генерации неодима. Изложены физико-химические, люминесцентные, лазерные свойства и способы синтеза неорганических жидкостей. Рассмотрены системы накачки, резонаторы и различные режимы генерации и усиления в лазерах. Проведено сравнение с элементами и режимами аналогичных лазеров.

Для научных сотрудников и инженеров, работающих с лазерами на неорганических жидких люминофорах и на других конденсированных средах, а также аспирантов и студентов, специализирующихся в этой области.

Баранова Л. П., Явор С. Я. Электростатические электронные линзы. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. — 14 л.

Систематически изложены теории фокусировки, а также геометрических и хроматических аберраций электростатических электронных линз. Рассмотрена оптика концентрирующих систем на основе теории фазового пространства. Описаны основные типы линз: осесимметричные, квадрупольные, двумерные и новые линзы — трансаксиальные и скрещенные. Приведены их параметры и указаны основные области применения.

Для научных работников и инженеров, занятых расчетом и конструированием электронно-оптических устройств, а также для студентов и аспирантов физико-технических и радиотехнических специальностей.