

## ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*Р.П.Быстров, А.В.Соколов, С.А.Соколов  
ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН*

*При распространении радиоволн рассмотрены случайные замирания сигналов, гауссовы спектры которых соответствуют теории В.И.Татарского. Показано влияние конвективных переносов воздушных масс с изменением интенсивности нефрактальных радиосигналов, соответствующих по типу регулярной неоднородной рефракции радиоволн. Описаны суточные и сезонные типы замираний, а также явления сверхрефракции, субрефракции и временные качания диаграммы антенны.*

### 1. Хаотические замирания в толще атмосферы

Известно, что в радиолокации и связи субмиллиметровые (СБММ), миллиметровые (ММ), сантиметровые (СМ) и дециметровые (ДМ) волны испытывают при распространении колебания силы приема радиосигналов в атмосфере, которые носят название замираний или фединга. В принципе такие замирания существенно ухудшают работу различных радиосистем в зависимости от состояния атмосферы, распределения показателя преломления воздуха и его временных и пространственных колебаний.

Физические процессы таких замираний в атмосфере весьма многочисленны и статистически хорошо изучены.

Ли и Ватерманом убедительно показано [1], что теория В.И.Татарского [2] может удовлетворительно описывать амплитуду замираний на ММ и СМ волнах.

Предполагая отсутствие слоев инверсий и считая, что частотный спектр флуктуаций показателя преломления воздуха пропорционален  $f^{5/3}$ , можно получить следующие выражения для определения логарифма амплитуды замираний на трассах, расположенных вдоль земной поверхности на высотах в несколько десятков метров:

$$\left( \ln \frac{\bar{E}}{E_0} \right)^2 = 0,32 C_n^2 (2\pi / \lambda)^{7/6} d^{11/6} \quad , \quad (1)$$

$$\left( \frac{\bar{E}}{E_0} \right)^2 = \overline{(\Delta n)^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 L_0 d, \quad (2)$$

где  $E_0$  - средняя амплитуда сигнала;  $E$  - её мгновенное значение;  $C_n^2$  - параметр, связанный со структурой показателя преломления;  $l_0$  - наименьший размер неоднородности ( порядка нескольких миллиметров), при котором рассеяние энергии из-за сил вязкости играет существенную роль;  $L_0$  - максимальный размер изотропной неоднородности показателя преломления;  $d$  - длина трассы;  $\lambda$  - длина волны;  $\overline{(\Delta n)^2}$  - средний квадрат флуктуации показателя преломления на неоднородности  $L_0$ .

Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей максимальных величин замираний на волне 3 мм от расстояния для коротких трасс показало хорошее согласие с экспериментом.

Анализ опубликованных данных о флуктуациях миллиметровых волн показывает, что в случае наземных трасс длиной до 100 км максимальные величины, обусловленные неоднородностями показателя преломления турбулентного происхождения могут достигать  $\pm 6 \dots 8$  дБ, что находится в удовлетворительном согласии с экспериментом. На вертикальных трассах при распространении сквозь толщу атмосферы эти замирания могут составлять  $\pm 2 \dots 4$  дБ. Представляют интерес результаты экспериментов в толще атмосферы по приему сигналов с ИСЗ на волне 4,1 см [3]. При углах места менее  $3^\circ$  в 0,1% процента времени замирания имеют величину более 6 или 10 дБ соответственно для зимнего и летнего времени. При углах места меньше  $1^\circ$  величина замираний превышает 20 дБ.

### 2. Медленные флуктуации показателя преломления рефракционного типа.

При распространении радиоволн существуют явления, не относящиеся к фрактальным случайным образованиям атмосферы. Имеет место рефракция, обусловленная безветренным конвективным переносом воздуха в атмосфере.

Изменчивость сигналов радиоволн можно описать следующими характеристиками: амплитудой, средней частотой замираний, их спектром и распределением их амплитуд во времени, а также дисперсией флуктуаций.

Известно, что флуктуации на этих волнах занимают частотный интервал 0...100 Гц и более. С ростом частоты флуктуаций амплитуда их быстро падает, наибольший интерес представляет изучение самых глубоких замираний с частотой 15...30 Гц.

### 3. Конвективные амплитудные и фазовые флуктуации радиосигналов

Под быстрыми замираниями обычно понимают кратковременное снижение уровня принимаемого сигнала по времени от долей секунды до секунд. Замирания с продолжительностью от минуты и более считаются медленными. Наконец, могут иметь место очень медленные колебания силы приема продолжительностью от одного часа до суток и более. Классификация замираний по их продолжительности является условной и возможна только на основе изучения связи характера принимаемых сигналов с метеорологическими условиями.

На СМ, ММ и СБММ волнах возможна классификация замираний по причинам их возникновения.

1. Медленные рефракционные замирания – суточные или сезонные, обусловленные конвективными процессами и слоистым строением атмосферы.

2. Замирания типа случайных самоподобных недифференцируемых фракталов по типу фрактального броуновского движения (ФБД) и подчиняющиеся закону Гаусса; как показал Мандельброт, такие замирания обусловлены рассеянием на турбулентных неоднородностях тропосферы.

3. Многолучевые замирания, возникающие из-за отражений радиоволн от слоев инверсий, при которых в точку приема могут приходить одновременно несколько сигналов с произвольными амплитудами и фазами.

4. Замирания, вызванные повышенной рефракцией или сверхрефракцией; этот тип замираний наблюдается в безветренную погоду в случаях узких направленных пучков излучения, когда луч передатчика выходит из зоны диаграммы направленности приемной антенны и передатчика. Дальность распространения при сверхрефракции может увеличиваться при неизменной мощности излучения в 3-5 раз.

5. При субрефракции уменьшается амплитуда замираний, и дальность действия передатчика при неизменной мощности излучения падает.

На миллиметровых и субмиллиметровых волнах возможна классификация замираний из экспериментальных данных на различных расстояниях на суше и на море. Типичные примеры показаны на рис 1, где изображен усредненный суточный ход замираний для двух зимних месяцев, длина трассы исследований составляла 24 км на волне 8,6 мм.[4].

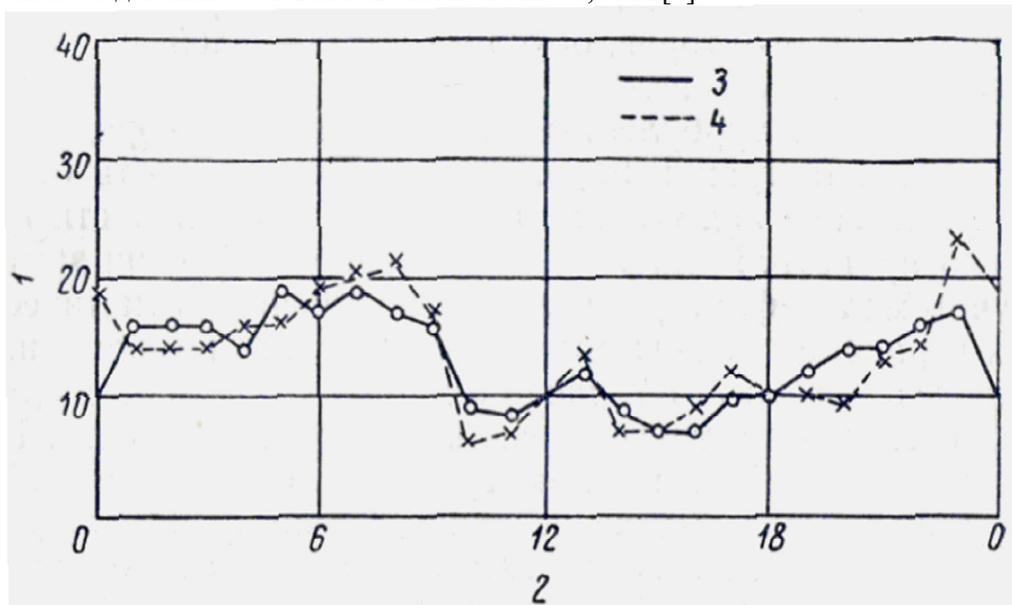
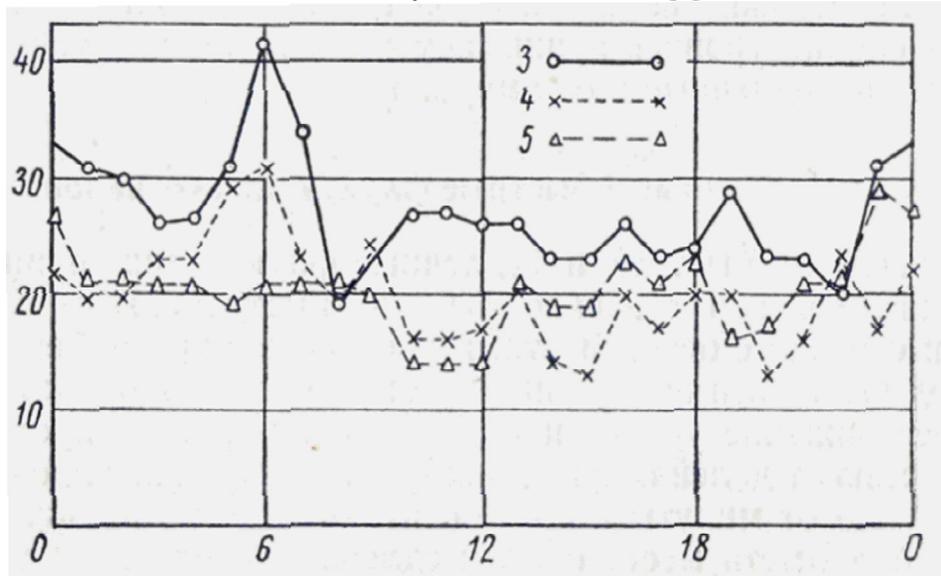


Рис 1. Зависимость усредненного суточного хода амплитуд замираний на длине волны излучения 8,6 мм: 1-амплитуда замираний, дБ; 2- время суток; 3- январь; 4- февраль.

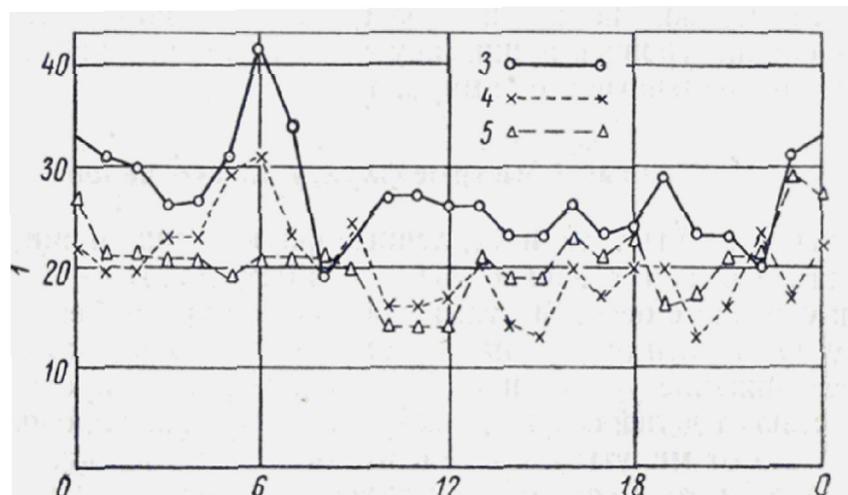
Из рис. 1 видно, что в антициклональную погоду уровень сигнала повышается на 13-20 дБ, в то время как в дневное время уровень поля снижается до 8-10 дБ.

На рис. 2 представлена диаграмма усредненных замираний суточного хода на волне 8,6 мм на длине трассы в 24 км для одного летнего и двух осенних месяцев [5].



**Рис.2.** Зависимость суточного хода усредненных амплитуд замираний на волне 8,6 мм: 1- амплитуда замираний, дБ; 2- часы суток; 3- август; 4- сентябрь; 5 - октябрь.

По результатам экспериментов видно, что уровень сигнала в течение суток летом поднимался выше 25 дБ, в то время в осенние месяцы уровень сигнала уменьшается до 10 дБ. На рис. 1 и 2 отчетливо проявляется влияние конвективной рефракции, повышающей уровень сигнала при одной и той же мощности передатчика.

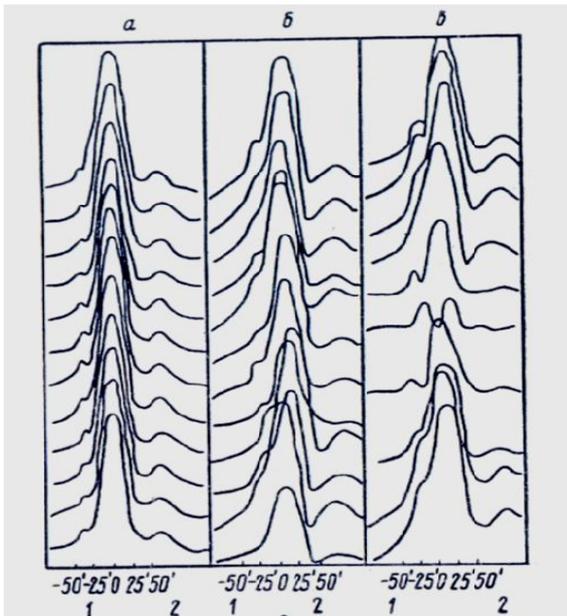


**Рис. 3.** Зависимость углов прихода от времени, усредненных за 1 мин. на 8,6 мм: 1- углы прихода в угловых мин.; сплошная линия - разность между макс. и мин. углами за 1 мин. (угловые минуты - правая шкала); штрих- пунктирные линии - разность между 90% и 10% величинами за 1 мин. (угл. мин. правая шкала); 2 - часы суток; 3- диапазон углов прихода (в угл. мин).

На рис 3 приведен результат изменения углов прихода, усредняемых по времени 1 мин., на волне 8,6 мм на трассе 80 км (29-30 августа) [5]. Углы прихода радиоволн довольно быстро изменяются во времени.

Из рис. 3 видно, что в течение ночного времени амплитуда суточного хода, а также разности между максимальными и минимальными значениями возрастают. Видно, что с 18 до 8 час. амплитуда сигнала увеличивается на 7-10 дБ.

С ростом длины трассы амплитуда замираний на миллиметровых волнах растет, однако на сантиметровых волнах зависимости менее заметны.



**Рис. 4.** Диаграммы направленности антенны на волне 8,6 мм и трассе 80 км: а - без заметных изменений углов прихода; б - с заметными отклонениями углов прихода; в - с заметными отклонениями углов прихода; 1 - вниз; 2 - вверх; 3 - угол возвышения в мин.

#### 4. Пространственные колебания диаграммы антенны

Большой частью наблюдается изменение углов прихода в вертикальной плоскости, поскольку вертикальные градиенты оказываются существенно сильнее горизонтальных. Такие колебания могут вызываться рассеянием на неоднородностях турбулентного происхождения либо отражений от различных приподнятых слоев инверсий.

Наличие этих явлений в атмосфере может приводить в одних случаях к изменению ширины диаграммы направленности антенн, в других - к искажению формы диаграммы или отклонению её от оси. Исследования углов прихода радиоволн в СМ, ММ и СБММ диапазонах были проведены при механическом качании диаграммы приемной антенны относительно среднего по времени ее положения. Характеристики приемных антенн приведены в табл. 1. В последней колонке таблицы указаны пределы изменения углов прихода.

**Таблица 1**

*Характеристики приемной аппаратуры при измерениях углов прихода радиоволн*

Апертура антенны, м	Длина волны	Ширина диаграммы направленности, град	Длина трассы, км	Период качания, с	Точность, град	Пределы изменения углов (10...90%)
6×0,6	1,25 см	0,13	20,4	20	0,01	9'
∅ 1,2	8,6. мм	0,5	80	1,2	0,033	18'
∅ 1	0,86 мм	0,4	2,6;	20	0,004	2,3'

На рис. 4 показаны колебания диаграммы направленности на волне 8,6 мм на трассе 80 км и волне 8,6 мм [ 5]. При этом наблюдалась деформация формы диаграммы направленности антенны.

Максимальная скорость изменений угла прихода волны в вертикальной плоскости составила около 1'/с, абсолютное максимальное отклонение от диаграммы антенны вверх 24'. Колебание диаграммы излучения, как целого, встречалось в экспериментах довольно часто.

Наиболее существенными оказываются колебания углов в вертикальной плоскости.

#### 5. Изменчивость регулярной рефракции

В общем случае рефракции угол  $\alpha$ , представляющий собой угол в точке приема между истинным и кажущимся направлением на источник излучения, определяется известным выражением (3):

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{a}{a+H} \sin(z + \alpha) \right] + \int_0^H \frac{dh}{\sqrt{\frac{n_h^2}{n_0^2} (a+h)^2 - 1}} - z, \quad (3)$$

где  $a$  - радиус Земли (отличие от шаровой формы несущественно);  $H$ -высота источника излучения;  $n_h$  - текущее значение  $n$ ;  $n_0$  - значение  $n$  у поверхности Земли (в точке приема излучения);  $z$ - видимый зенитный угол источника излучения.

Регулярная рефракция меняется во времени, связанная с изменением вертикального распределения  $n$ .

Регулярные изменения можно оценить по таблицам типа астрономической рефракции, обеспечивающих точность около 1" при зенитных углах менее 80°. Нами также была разработана компьютерная программа, позволяющая с высокой точностью рассчитывать эффективные длины, углы прихода, ослабления, таблицы рефракции и т.д. по имеющимся данным многолетних наблюдений параметров атмосферы и имеющимися теоретическими моделями. Данные расчетов хорошо согласуются с экспериментом.

В табл. 2 приведены возможные пределы изменений  $\alpha$  для некоторых зенитных углов  $z$  и высот  $H$  источника излучения над поверхностью Земли (пределы изменений  $\alpha$  определяются возможными изменениями вертикального распределения  $n$ ).

Таблица 2

*Пределы изменений рефракции  $\alpha$  для зенитных углов  $z$  и высот  $H$*

$z$ , град.	90			80			60			20		
$H$ , км	60	500	$\infty$	60	500	$\infty$	60	500	$\infty$	60	500	$\infty$
$\alpha$ , угл. с	1530–2706	1814–3151	1969–3402	252–372	289–416	297–426	85–117	92–131	94–133	16–24	19–27	20–28

При расположении трассы вдоль поверхности Земли, когда высота антенн корреспондирующих пунктов одинакова или не сильно отличается, для расчета рефракции можно применить упрощенную формулу:

$$\alpha = \frac{L |g_n|}{2}, \quad (4)$$

где  $L$  - длина трассы, км;  $g_n = -10^{-7} \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$  - вертикальный градиент коэффициента преломления.

Для стандартной атмосферы  $g_n = -4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ . Учитывая, что в приземном слое особенно велики вертикальные градиенты температуры и влажности воздуха, определяющие градиент  $g_n$ , можно принять  $g_n = -10^{-7} \text{ м}^{-1}$ . Тогда для приземного слоя будем иметь следующие ориентировочные значения на трассах различной протяженности.

Таблица 3.

$L$ , км	10	20	30	50
$\alpha$ , угл. с	103	206	309	515

Угол рефракции не зависит от частоты падающего излучения. В реальных условиях углы рефракции будут меньше тех, что указаны в табл. 2. Так, в прошлом М. А. Колосов на волне 3,2 см и трассе 28,4 км на основе изучения связи углов рефракции с вертикальными градиентами показателя преломления получил следующую экспериментальную формулу:

$$\alpha = \frac{L |g_n|}{2,9} \pm 3,5', \quad (5)$$

### 6. Влияние рефракции на величину принимаемого сигнала

Предположим, что на расстоянии  $L$  приемная и передающая антенна расположены так, что оси их главных лепестков находятся на одной прямой. Вследствие изменений рефракции изменятся траектории распространения, и прием излучения будет осуществляться не на оси диаграммы антенны, а под некоторым углом к ней, что вызовет ослабление принимаемого сигнала. Аналогично изменится и направление излучения, что также приведет к уменьшению величины принимаемого сигнала.

Коэффициент усиления параболической антенны вследствие указанных эффектов уменьшится на величину в случае связи:

$$A = \frac{J_1(u)}{u}, \quad (6)$$

где  $J_1(u)$  - функция Бесселя первого рода,  $u = k \frac{D}{2} \sin \alpha \approx \frac{kD}{2} \alpha$ ;  $D$  - диаметр антенны;  $k$  - волновое число.

Тогда потери на трассе для обеих антенн равного диаметра будут пропорциональны  $A^2$ . Предположим, например, что нас интересует величина  $A = 0,5$ , что будет при

$$\alpha = \frac{1,02\lambda}{2D}. \quad (7)$$

Определим те предельные размеры  $D$  антенны, при которых осуществляется условие  $A = 0,5$ . Воспользовавшись уравнением (7), получим:

$$D = \frac{1,02\lambda}{L|g_n|}. \quad (8)$$

**Таблица 4**

$L$ , км	10	20	30	50
$D$ , м	1	0,5	0,33	0,2

Приведенные табл. 4 данные показывают те ограничения на размер антенн, которые накладываются на них регулярной рефракцией. При больших размерах антенн и длинных трассах при связи вследствие рефракции связь будет неустойчивой, и она будет нарушаться в зависимости от распределения коэффициента преломления.

#### 7. Сравнение рефракционных и фрактальных характеристик

Рефракционные и фрактальные флуктуации при распространении ДМ, СМ, ММ радиоволн различны по своим характеристикам. Так, например, фрактальные флуктуации в ветреную погоду (вихри воздуха) вызывают другой вид флуктуаций сигнала. При спокойной антициклональной погоде рефракция в атмосфере в зависимости от амплитуды показателя преломления обеспечивает устойчивое распространение радиоволн. В конвективных условиях погоды в теплое время года имеются случаи увеличения дальности действия систем за счет волноводного распространения. В этом случае среднее значение величины замираний увеличивается по амплитуде и их период растет по времени или же исчезает (постоянный сигнал). При субрефракции средний уровень сигнала и амплитуда замираний уменьшаются, а также падает дальность приема.

Колебания диаграммы излучения под воздействием ветровых нагрузок становятся значительными, диаграмма антенны деформируется, изменяется направленность излучения во времени. Наконец, при рефракции замирания обладают выраженным суточным, сезонным ходом, что требует учета погодных условий для работы радиотехнических систем.

#### Выводы.

- Хаотические замирания в толще атмосферы соответствуют теории рассеяния В.И.Татарского.
- При распространении СМ, ММВ и СБМВ имеются 5 основных типов замираний:
  - Медленные суточные, сезонные замирания, обусловленные конвективными процессами и слоистым строением атмосферы при повышенной рефракции, сверх рефракции и субрефракции.
  - Фрактальные замирания типа случайных самоподобных фракталов по типу ФБД и закону Гаусса.
  - Многолучевые замирания, возникающие из-за отражений радиоволн от слоев инверсий.
- В конвективной атмосфере при повышенной рефракции необходим учет апертуры антенн в зависимости от длины трассы связи или радиолокации.

#### Литература

- Lee R.W., Waterman A.R. »Rad. Science», 1958, 3, p.135-140.
- Татарский В.И. Теория флуктуационных явлений при распространении радиоволн. 1967. М.
- Mc Cormic and other // Electr. Lett., 1972, 8, №10 – p. 224.
- Funakawa K., Kido T., Kitamura K, and other, «Journal Rad.Res, Labor.», 1967, 14, №76. – p. 249.
- Crawford A., Sharpless W. Proc. IRE, 1946, 34, 845.