

**Южно-Уральский Государственный Университет  
Факультет Военного Обучения  
Военная Кафедра Связи**

**Цикл военно-специальной и военно-технической подготовки**

**Тема № 1 «Основы радиорелейной и тропосферной связи»**

**Занятие № 6 «Общая характеристика тропосферной связи»  
(лекция).**

Вопросы занятия:

1. Общая характеристика тропосферной связи.
2. Механизм и особенности дальнего тропосферного рассеяния УКВ .
3. Методы разнесенного приема (передачи) сигналов .

Челябинск, 2012г.

## **ВВОДНАЯ ЧАСТЬ - 15 мин.**

1. Ответить на вопросы, возникшие у студентов при самостоятельной подготовке.
2. Провести контрольный опрос студентов по материалам предыдущих лекций.

**Контрольные вопросы:**

- принцип радиорелейной связи
- свойства УКВ диапазона
- особенности распространения УКВ
- Объявить тему занятия.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ - 70 мин.

### Введение. - 5мин.

Тропосферная связь основана на использовании физического явления дальнего тропосферного распространения ультракоротких волн (ДТР УКВ), открытого в конце 40-х годов. Экспериментально было обнаружено, что УКВ рассеиваются и отражаются диэлектрическими неоднородностями воздушных масс тропосферы, распространяясь далеко за пределы радиовидимости, определяемой формулой:

$$R_{\text{км}} \approx 4,12 (\sqrt{h_1 [\text{м}]} + \sqrt{h_2 [\text{м}]})$$

Несмотря на то, что уровень электрического поля, возникающего вследствие ДТР УКВ на расстояниях более 90-100 км, значительно ниже (на 65-85 дБ) уровня поля при наличии прямой видимости, он, тем не менее, немного выше уровня поля, обусловленного дифракцией волн, и как оказалось, достаточен для обеспечения прямой радиосвязи с использованием УКВ на расстоянии сотен километров. Однако при этом оказывается необходимым увеличивать мощность радиопередающих устройств и улучшать энергетические параметры аппаратуры по сравнению с аппаратурой, используемой для обычной радиорелейной связи.

## 1. Общая характеристика тропосферной связи. - 20 мин.

### 1.1. Принцип тропосферной связи

Принцип тропосферной связи сходен с принципом радиорелейной связи (рис. 5.1) и во многом характеризуется теми же особенностями.

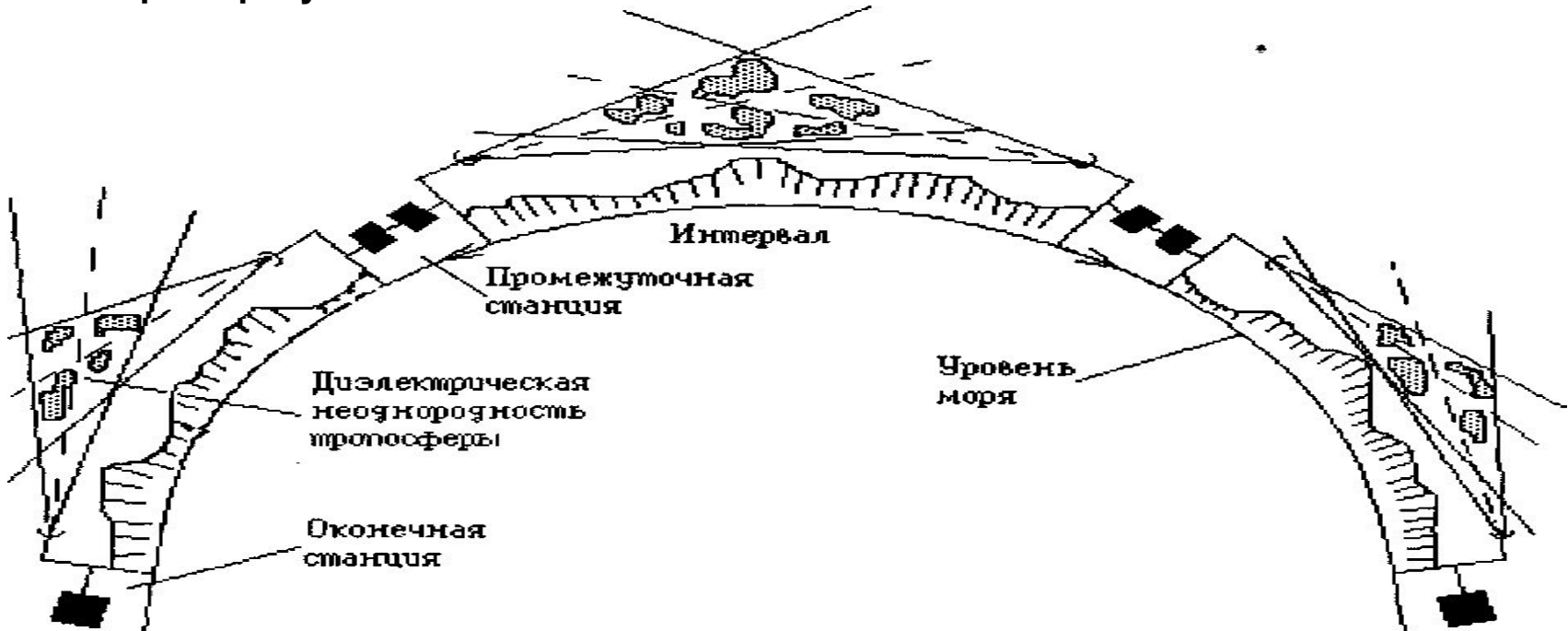


рис .5.1 Принцип тропосферной связи.



Но в то же время рассматриваемый принцип отличается присущим только ему важным признаком, заключающимся в применении на интервалах тропосферных линий (ТРЛ) метода тропосферной радиосвязи, при котором используется явление ДТР УКВ, благодаря чему увеличиваются протяженности интервалов ТРЛ в 4-6 раз по сравнению с интервалами РРЛ прямой видимости.

Вследствие сходства с радиорелейной связью тропосферную связь часто называют тропосферной радиорелейной связью. Метод тропосферной радиосвязи своеобразен в том смысле, что являясь способом радиосвязи, он реализуется только в присутствии воздушной среды, неоднородной по своим диэлектрическим свойствам. Этому условию удовлетворяет тропосфера земли, высоту слоя которой над уровнем моря, принято ограничивать значением  $h_T$ . Суть тропосферной радиосвязи видна из рис. 5.2.:

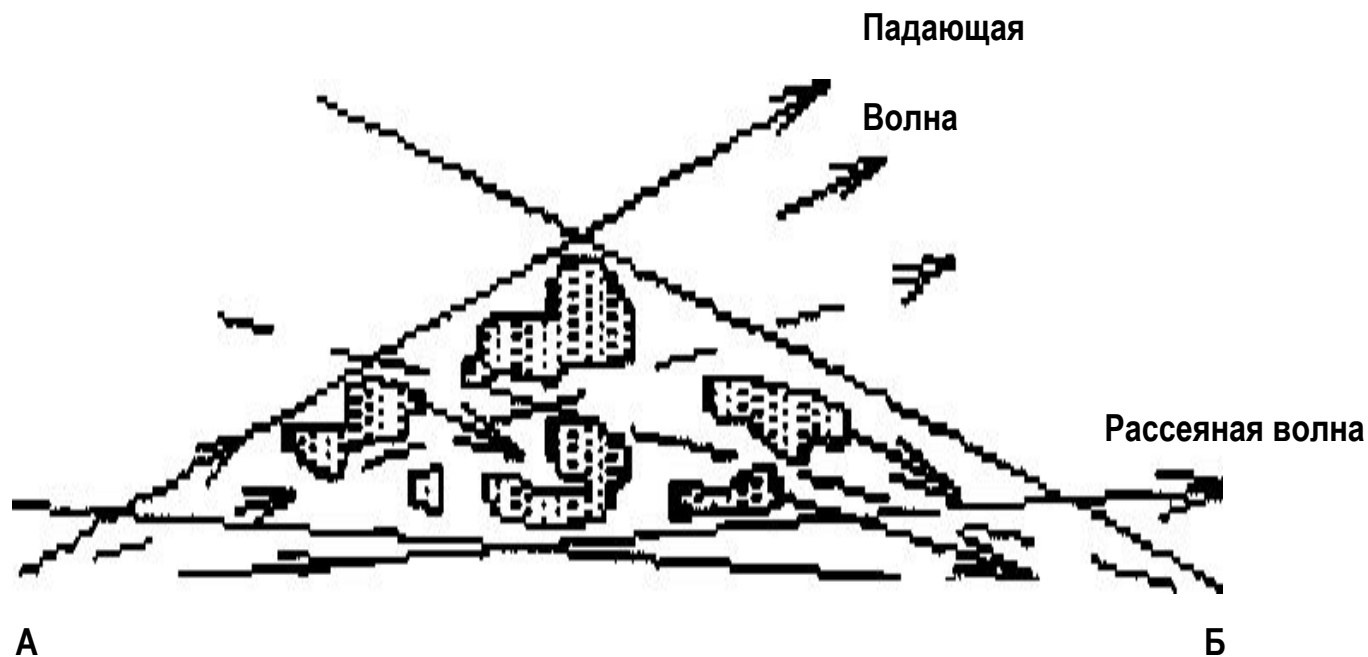


рис .5.2. Принцип дальнего тропосферного распространения УКВ, лежащий в основе тропосферной радиосвязи.



Направленный поток энергии УКВ, посылаемый передающей антенной станции А, так называемая падающая волна, пронизывает толщу тропосферы и в виде проходящей волны уходит в открытое пространство. Неоднородности воздушных масс, являющиеся одновременно неоднородностями диэлектрической проницаемости среда, рассеивают под небольшими углами к направлению падающей волны некоторую весьма небольшую часть энергии волн. Часть рассеянной энергии при условии, что она оказывается направленной в сторону приемной антенны станции Б, используется для обеспечения связи между станциями А и Б.

Благодаря большой протяженности интервалов тропосферные линии могут разворачиваться в труднодоступной местности со слабо развитой сетью коммуникаций, с обширными водными преградами, лесными и горными массивами и т. п. Широкое распространение получили одноинтервальные ТРЛ, обеспечивающие прямые связи на расстояния сотен километров.

Возможность организации прямых связей без «мертвых» зон в пределах от единиц до сотен километров с помощью подвижных тропосферных станций (ТРС), а также относительно быстрое разворачивание с помощью этих станций тропосферных линий, состоящих из ряда интервалов явились причиной быстрого развития военных подвижных тропосферных средств связи.

В настоящее время с помощью ТРС осуществляется надежное управление до КП дивизий включительно.

## 1.2. Предельная дальность тропосферной связи.

Предельная дальность тропосферной связи определяется толщиной тропосферы  $h_0$  и высотами размещения антенн  $h_{A1}$  и  $h_{A2}$ .

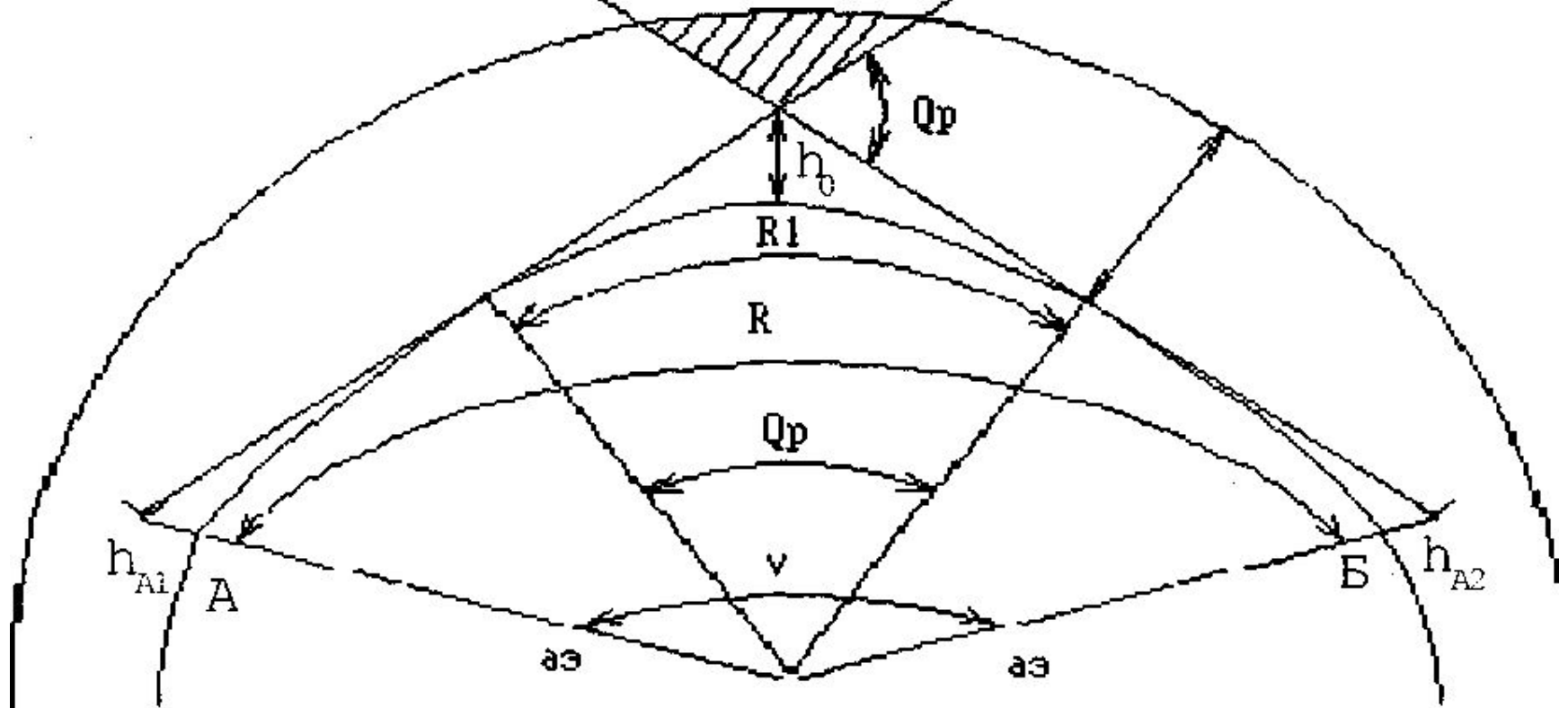


рис .5.3. Пояснение предельной дальности тропосферной радиосвязи на одном интервале.



На рисунке поверхность земли предполагается гладкой, и из электрических центров антенн станций А и Б к ее поверхности проведены касательные, лежащее в общей вертикальной плоскости. Точка пересечения касательных, находящаяся на высоте  $h_Q$ , определяет нижнюю границу слоя тропосферы, «видимого» одновременно из точек электрических центров антенн обеих станций. Верхняя граница слоя определяется верхней границей всей толщи тропосферы  $h$ . Таким образом, в принципе тропосферная радиосвязь возможна, пока существует объем рассеяния тропосферы, отмеченный на рис. 5.3 заштрихованной фигурой, т.е. когда  $h_0 < h_T$ .

Из рисунка видно, что протяженность интервала  $R$ , где расстояние  $R_2 = R - R_1$ . Величины  $R_1$  и  $R_2$  могут быть получены на основании соотношений, приведенных в приложении 1. Легко показать, что:

$$R_1 \approx \sqrt{2a_z} \cdot 2\sqrt{h_0} \quad (5.1)$$

$$R_1 [\text{km}] \approx 4.12 \cdot 2\sqrt{h_0 [\text{m}]} \quad (5.2)$$

$$R_2 [\text{km}] \approx 4.12(\sqrt{h_{A1}} + \sqrt{h_{A2}}) [\text{m}] \quad (5.3)$$

$$R [\text{km}] \approx 4.12(2\sqrt{h_0 [\text{m}]} + \sqrt{h_{A1} [\text{m}]} + \sqrt{h_{A2} [\text{m}]}) \quad (5.4)$$

$$h_0 [\text{m}] \approx R_1^2 / 8a_z \quad (5.5)$$

где  $a_z$  - эквивалентный радиус Земли,  $a_z = 8500$  км.



При низко расположенных антеннах  $R \approx R_1$ , в этом случае теоретический предел дальности связи определяется формулой (5.2) путем подстановки в нее значения  $h_0 = h_T$  что дает величину  $R_{\text{ПРЕД}} \approx 1000 \text{ км}$ . На практике связь при  $h_0 = h_T$  реализовать затруднительно, поскольку объем рассеяния фактически уменьшается до нуля (для принятого значения  $h_T$ ). Поэтому дальности порядка 1000 км. (действительно близкие к предельным) на практике достигаются при значениях  $h_0 < h_T$  и условии, что высоты антенн  $h_{A1}$  и  $h_{A2}$  равны сотням метров (размещение станций на больших высотах, в горах). Указанная дальность связи (см. формулу 5.4) получается в предположении, что  $h_0$  не превышает 10 км.

Отметим, что предельная дальность при тропосферной прямой радиосвязи достигается при больших экономических затратах и только на уникальных стационарных линиях, где применяются особо мощные передатчики (мощностью в десятки киловатт), высоконаправленные дорогостоящие антенны с весьма большими коэффициентами усиления и, соответственно, размерами, сверхчувствительные радиоприёмные устройства и т. д. Обычно ограничиваются дальностями на интервалах не более 500 км. в основном 200-300 км. На подвижных военных ТРЛ интервалы, как правило, не превышают 120-200 км., иногда по соображениям организации связи применяются и более короткие интервалы.

### 1.3. Понятие о конфигурации объема рассеяния и геометрических параметрах интервалов реальных ТРЛ.

Правильное представление о конфигурации объемов рассеяния на интервалах реальных тропосферных линий и о порядке величин их геометрических параметров имеет существенное значение для понимания механизма и свойств ДТР УКВ, определяющих особенности тропосферной связи. К геометрическим параметрам, влияющим на конфигурацию объема рассеяния, относятся величины  $R$ ,  $h_{A1}$  и  $h_{A2}$  (рис. 5.3). Ими определяются параметры  $R_1$  и  $h_0$ . Кроме того, важными производными геометрическими параметрами являются: геоцентрический угол  $V$ , на который опирается дуга кривизны земной поверхности интервала, и минимальный угол рассеяния  $Q_p$ , соответствующий нижней точке объема рассеяния на высоте  $h_0$ . Угол  $Q_p$ ; как видно из рис. 5.3, равен геоцентрическому углу, на который опирается дуга кривизны земной поверхности  $R_1$ . Следовательно, при малых  $h_{A1}$  и  $h_{A2}$  значение  $Q_p \approx V$ . **Во-первых**, следует обратить внимание на малость значений углов и  $Q_p$ , которые нетрудно рассчитать, используя формулы (5.3) и (5.5). Для случая, учитывая, что  $h_{A1} = h_{A2} = 10\text{м}$ , и принимая поверхность земли гладкой, можно получить приближенные значения, приведенные в табл. 5.1.

| $R_1$ km | $R_2$ km | $R_1 = R - R_2$ km | $h_0$ km | $V$ град | $Q_p$ град |
|----------|----------|--------------------|----------|----------|------------|
| 500      | 26       | 474                | 3,3      | 3,4      | 3,2        |
| 150      | 26       | 124                | 0,23     | 1        | 0,84       |

**Во-вторых**, необходимо указать, что верхняя граница реального объёма рассеяния фактически определяется пересечением диаграмм направленности антенн и обычно лежит значительно ниже верхней границы толщи тропосферы. Чтобы пояснить это, обратимся к рис. 5.4 и произведем некоторые расчеты. Если углы направленности антенн в вертикальной плоскости  $L_v$  достаточно малы, то верхняя точка  $b$  объема рассеяния  $Q$ , отмеченного в разрезе заштрихованной фигурой  $abcd$ , может оказаться ниже уровня  $h_T$ .

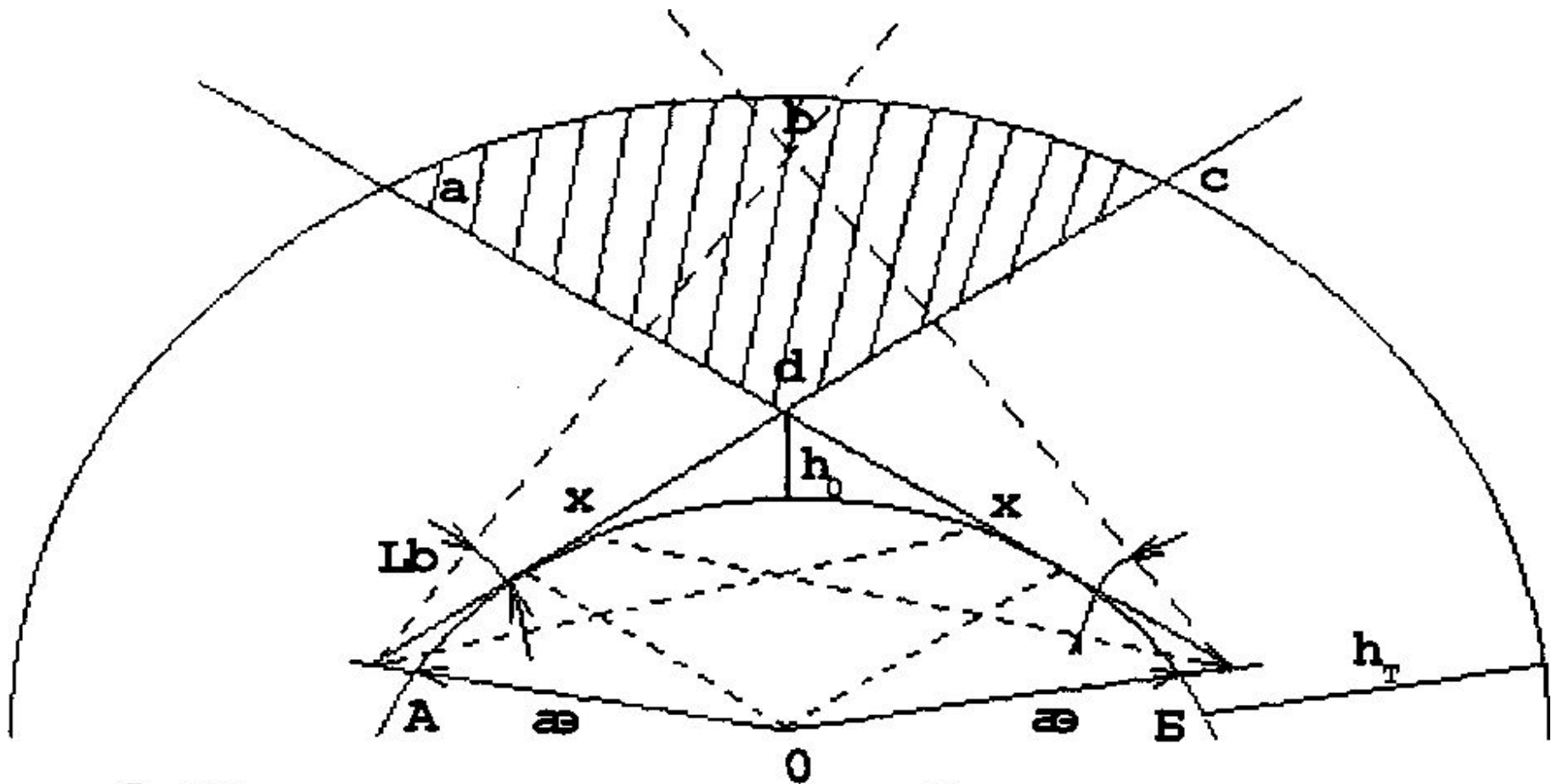


рис. 5.4 Пояснение понятия реального объема рассеяния, его границ и конфигурации.

Вертикальный размер объема рассеяния  $h = 4x$  определяется углом  $x$  и половиной протяженности интервала  $R/2$ . Учитывая малость углов  $Q_p$ ,  $L_b$  и выражая в градусах, можем записать

$$h_Q \approx R/2 (x/57,3) \quad (5.6)$$

Угол  $x$  зависит от угла направленности антенн  $L_b$ , угла места (угла возвышения) электрической оси антенны  $Q_m$  и угла  $\eta$ , под которым проходит проведенная из электрического центра антенны касательная к поверхности земли относительно горизонтали, проведенной через электрическим центр этой же антенны, а именно:

$$x = L_b/2 + Q_m + \eta \quad (5.7)$$

Можно показать, что для гладкой поверхности земли при  $a_z = 8500$  км:

$$\eta [\text{град}] \approx 0,88 \sqrt{h_{A\Sigma} [\text{км}]} \quad (5.8)$$

Здесь  $h_{A\Sigma}$ , равна сумме высот антенной опоры  $h_A$  и местности над уровнем моря  $h_{CT}$ , где размещена ТРС, т.е. величина  $\eta$  соизмерима с реальными значениями  $L_b$  (составляющими для антенн подвижных ТРС единицы градусов) только при больших высотах расположения антенн, порядка сотен метров (большие высоты местности, горы). Чаще всего на равнинной и среднепересеченной местности величина  $\eta \approx 0$ .

Угол места  $Q_m$  выбирается таким, чтобы максимум излучения антенны был направлен в нижнюю область объема рассеяния, поскольку при этом достигается максимум уровня рассеянного поля в точке приема. Отсюда следует, что величина  $Q_m$  связана с  $\eta$ . При больших значениях  $h_A$  и соответствующих больших  $\eta$  величина  $Q_m$  может быть выбрана отрицательной (в формулу 5.7 ее вводят со знаком минус). При малых высотах антенн, когда  $\eta \approx 0$ , величина  $Q_m$  может иметь положительное значение, обычно на практике не превышающее  $\sim 0,5^\circ$ . Таким образом, положение верхней точки  $b$  объема рассеяния можно ограничить значением угла  $x$ , при котором в выражении (5.7) можно принять  $\eta = 0$  и  $Q_m \approx 0,5^\circ$ . Результаты расчета сведены в табл. 5.2:

| R<br>км | Lb<br>град | x<br>град | $h_q$<br>км | $h_0$<br>км | $h_b$<br>км |
|---------|------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 500     | 1          | 1         | 4,4         | 3,3         | 7,7         |
| 150     | 2          | 1/5       | 2           | 0,2         | 2,2         |
| 150     | 5          | 3         | 4           | 0,2         | 4,2         |

Из таблицы видно, что высота точки  $b$  над поверхностью земли (т.е. величина  $h_b$ ) даже на интервалах большой протяженности существенно меньше величины  $h_T$ , а вертикальный размер объема рассеяния на реальных интервалах составляет величины порядка 2-4,5 км.

**В-третьих**, необходимо обратить внимание на сильную вытянутость объема рассеяния вдоль интервала, что объясняется малостью углов  $Q_p$  и  $L_b$ . Можно показать, что горизонтальный размер  $l_Q = ac$  объема рассеяния  $Q$  достигает значений  $(0,8-0,85) R$ , т.е. составляет почти всю длину интервала и в десятки раз превышает вертикальный размер  $h_Q = bd$ . На чертежах, подобных рис .5.4, это не отражается, поскольку такие чертежи строятся при существенно различных масштабах, принимаемых для изображения величин  $aэ$ ,  $R$  и  $h_T$ , что приводит к сильному искажению реальных геометрических пропорций и, в частности, углов.

Таким образом, объем рассеяния реальных интервалов ТРЛ по своей конфигурации представляет собой сильно вытянутое сигарообразное тело, максимальный поперечный размер которого составляет единицы километров, длина приближается к длине интервала, а высота расположения нижней границы над поверхностью земли в средней части интервала составляет сотни метров - единицы километров. Рассеяние волн за пределы горизонта происходит под весьма небольшими углами, составляющими величины порядка  $0,8-3^\circ$ .



## 2. Механизм и особенности дальнего тропосферного рассеяния УКВ. - 20 мин.

### 2.1. Диэлектрическая неоднородность тропосферы.

Диэлектрические свойства воздушных масс тропосферы определяются физическими параметрами воздуха - температурой, давлением и влажностью, которые непрерывно изменяются, различные в различных точках тропосферы и зависят от метеорологических и климатических условий, сезона года и высоты над уровнем моря.

**Рассмотрим эти зависимости.**

Диэлектрические свойства воздуха характеризуются диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и коэффициентом преломления  $n$ , связанным с  $\epsilon$  соотношением:  $\epsilon = n^2$

Для воздуха эти величины близки к единице, т.е. превышают единицу лишь в десятитысячных и более мелких долях. Оперировать такими величинами в практических расчетах неудобно, поэтому вводится так называемый приведенный коэффициент преломления:  $N = (n - 1) 10^6 \approx ((\epsilon - 1)/2) 10^6$

Индекс преломления измеряется в N-единицах и численно связан с физическими параметрами воздуха формулой:

$$N = ((77,6/T (p + (4810/1) e))$$

где  $T$  - абсолютная температура, град;

$p$  - давление воздуха, мбар;

$e$  - упругости содержащегося в воздухе водяного пара (абсолютная влажность), мбар.

С синоптическими данными эти параметры связаны соотношениями:

$$TK = C^\circ + 273$$

$$p(\text{мбар}) = 1,3p(\text{мм. рт. ст.})$$

$$e(\text{мбар}) = (E(t^0)/100) S$$

где  $S$  - относительная влажность, %;

$E(t^0)$  - давление содержащихся в воздухе водяных паров, которое зависит от температуры.

|          |     |     |     |     |     |   |      |    |    |    |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|---|------|----|----|----|
| $t^0, c$ | -20 | -15 | -30 | -5  | 0   | 5 | 10   | 15 | 20 | 30 |
| $E(t^0)$ | 1,3 | 2,4 | 3,0 | 4,7 | 6,2 | 9 | 32,4 | 19 | 25 | 40 |

Под диэлектрической макроструктурой тропосферы понимают распределение по всему объему тропосферы (по географическим значениям широты и долготы и по высоте над уровнем моря до  $h_T$ ) среднемесячных значений величины  $N$ , обозначаемых  $N_{cp}$ . Практическое значение параметра  $N_{cp}$  весьма велико, так как условия прохождения волн при ДТР УКВ зависят от этой величины в очень большой степени. Достаточно сказать, что на интервалах протяженностью 150 -200 км увеличение и уменьшение величины  $N_{cp}$  на 10  $N$ -единиц приводит к соответствующему уменьшению или увеличению затухания уровня радиосигнала примерно на 5 дБ, что эквивалентно уменьшению или увеличению мощности радиопередающего устройства более чем в три раза.

На уровне моря значения  $N_{cp}$  принято обозначать через  $N_0$ , а на высоте  $h$  - через  $N_{cp}(h)$ . С увеличением высоты  $h$  величина  $N_{cp}$  монотонно уменьшается по экспоненциальному закону, определяемому выражением:

$$N_{cp}(h) = N_0 e^{(gN_0 h / N_0)},$$

где  $gN_0$  - среднее значение вертикального градиента индекса преломления на уровне моря;

$h$  - высота, м.

Под диэлектрической микроструктурой понимают мгновенные отклонения величин  $N$  и  $g_N$  от их средних значений в данной точке тропосферы. Эти отклонения случайны непрерывно изменяются вследствие случайного изменения в каждой точке объема тропосферы физических параметров воздуха - температуры, давления и влажности.

Таким образом, диэлектрическая микроструктура тропосферы обусловлена микроструктурой воздушных масс, физическая модель которой основана на представлении о том, что в воздушном пространстве существуют находящиеся в непрерывном движении и изменении местные (локальные) неоднородности двух типов: вихревые, аппроксимируемые горизонтально приплюснутыми сферами (т.н. глобулами), и слоистые, горизонтально вытянутые, представляемые сильно сплюснутыми слоями.

Подвижность глобул сравнительно велика, возникновение отображаемых ими вихрей, изменения их размеров и распад происходят достаточно быстро (минуты, доли минут). Подвижность слоев гораздо меньше, структура их более устойчива, возникновение, изменения и распад относительно медленны (десятки минут, часы).

Подвижности воздушных масс обусловлены неравномерностью разогрева лучистой энергией Солнца поверхности земли и воздуха и вследствие этого горизонтальных перемещений воздушных масс (ветров) и вертикальных (конвекционных) потоков. На границах соседних горизонтальных или вертикальных потоков воздуха, если их относительная скорость превосходит критическое значение, зависящее от вязкости среды (для воздуха эта скорость мала), в соответствии с теорией турбулентности жидкостей и газов А. Н. Колмогорова и А. М. Обухова возникает турбулентное (вихревое) движение воздуха. Первоначальные размеры вихрей составляют в диаметре десятки и сотни метров, далее они дробятся на более мелкие вихри и их энергия переходит в тепловую; диапазон средних диаметров вихрей (глобул) - от сотен метров до сантиметров. Наиболее вероятны вихри, составляющие в поперечнике 50-60 м. Вихревые неоднородности существуют практически регулярно на всех высотах тропосферы, хотя в нижних слоях они более интенсивны. Слоистые неоднородности возникают по ряду причин. Слои, в которых по высоте наблюдается положительный (вместо нормального отрицательного) температурный градиент, так называемые температурные инверсии, возникают: вследствие динамического разогрева в ветровом слое, в результате адиабатического разогрева воздуха при его оседании и сжатии в областях антициклона, вследствие натекания разогретых воздушных масс на водную поверхность, при радиационном охлаждении почвы в ясные летние ночи после жаркого дня и т. д. Кроме инверсионных существуют слои, в пределах толщины которых с увеличением высоты температура сначала повышается, а затем плавно понижается.



Вертикальные размеры слоев составляют величины порядка десятков метров, реже сотен метров. Протяженность слоев достигает единиц и десятков километров. Слоистые неоднородности существуют нерегулярно, однако, как правило, до высот порядка двух километров (что важно для подвижных ТРЛ) количество слоев протяженностью 0,5-10 км составляет 4-5 на один километр высоты. Облака, характерный частный случай слоистых неоднородностей, видимых глазом.

Диэлектрическая "контрастность" глобул и слоев различна и характеризуется перепадом величины  $N$  на границах неоднородностей. На границах глобул скачки  $N$  составляют (0,1-3)  $N$ -единиц, в среднем они уменьшаются с увеличением высоты. На границах слоев перепады  $N$  на порядок больше и лежат в пределах (1-10)  $N$ -единиц.

Графическим отображением "мгновенного" состояния микроструктуры тропосферы является реализация вертикального  $N$ -профиля тропосферы, снятая с помощью радиорефрактомера:

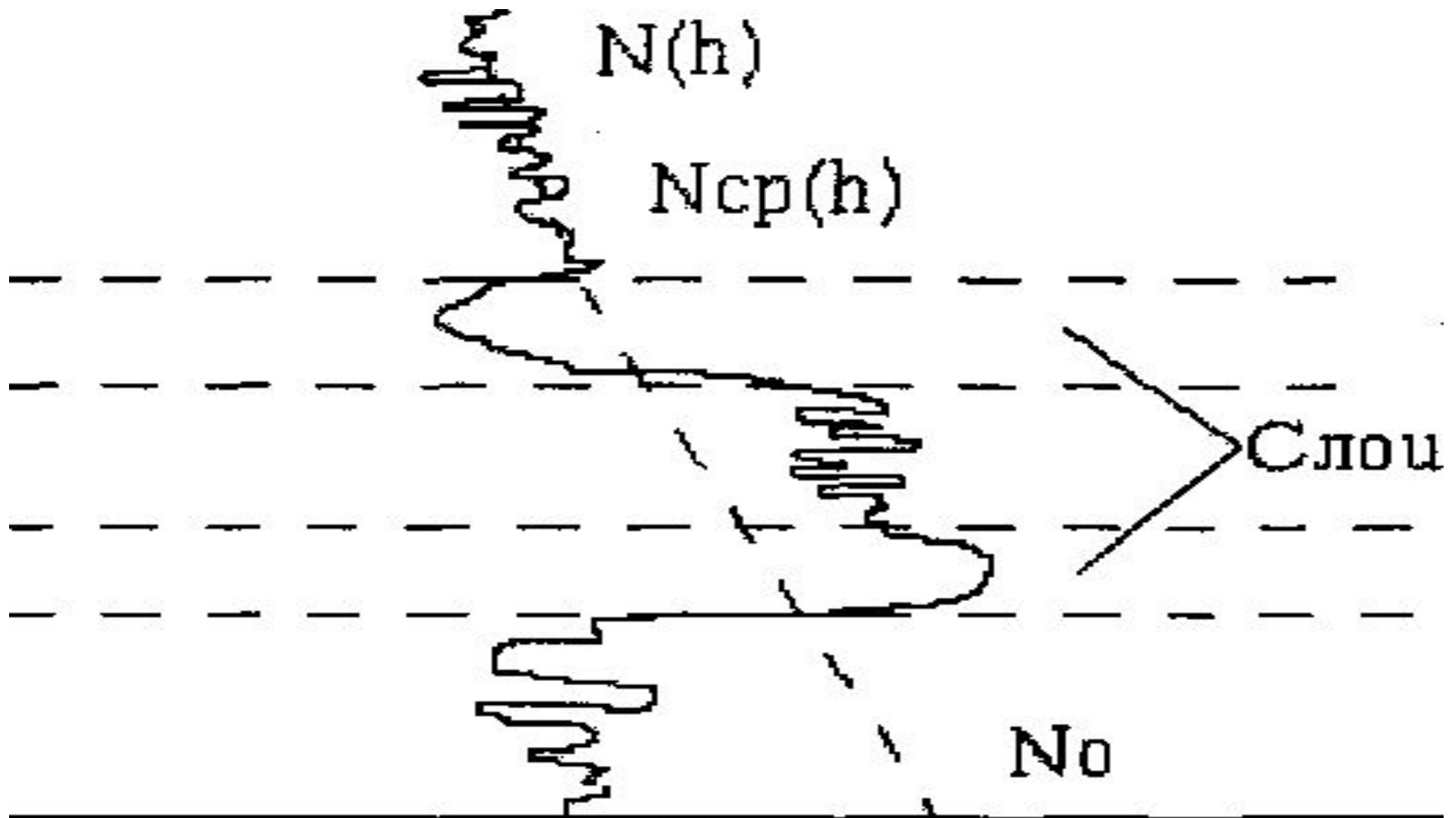


Рис. 5.12 Вид одной реализации вертикального "мгновенного"  $N$  - профиля тропосферы.

(h) могут быть существенными. Мелкие отклонения обусловлены влиянием глобул, значительные отклонения определяются присутствием слоев.

Средние значения  $N(h)$  и их  $N$ -профили получают путем усреднения ряда реализаций, снимаемых в течение соответствующего месяца.

Количественно микроструктура тропосферы характеризуется статистическими методами. Величина  $N$  представляется в виде: 
$$N = N_{\text{ср}} + \Delta N$$

где  $\Delta N$  - мгновенное случайное отклонение величины  $N$  от  $N_{\text{ср}}$  в рассматриваемом локальном объеме ("точке") тропосферы.

Кроме того, вводится среднеквадратичное на единицу длины (обычно 1 км) значение величины  $\Delta N$ , обозначаемое  $\Delta N^2$  и называемое интенсивностью флуктуаций (на данном отрезке длины). Чем больше интенсивность флуктуаций, тем сильнее эффект рассеяния волн.

## 2.2. Механизм дальнего тропосферного распространения УКВ.

Механизм ДТР УКВ весьма сложен, в нем сочетаются в различных пропорциях, изменяющихся во времени, несколько процессов, которые в соответствии с физической моделью тропосферы чаще всего принято разделять на три: рассеяние радиоволн турбулентными неоднородностями (глобулами); отражение волн слоистыми неоднородностями; отражение волн всей толщей тропосферы.

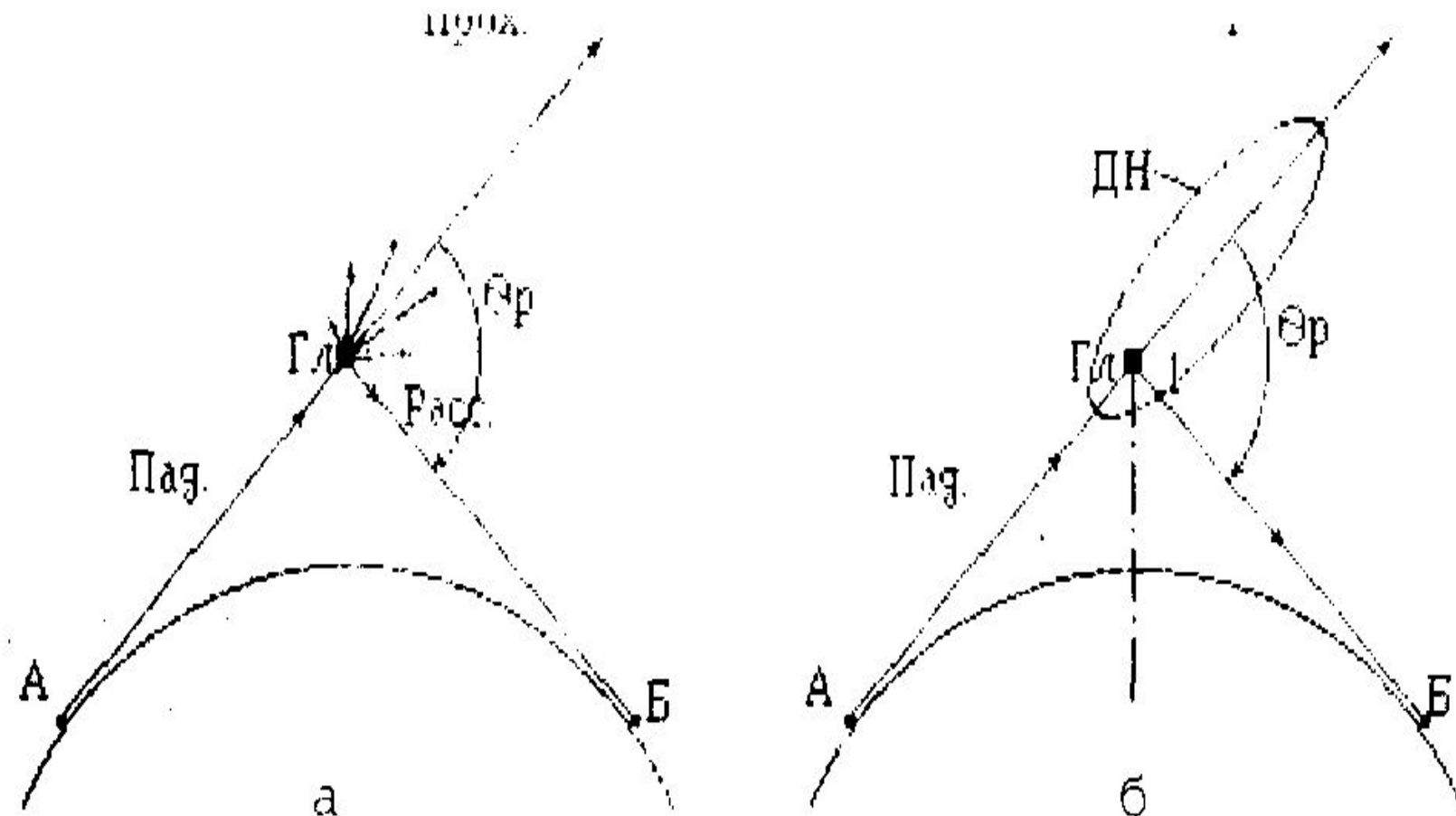


Рис .5.13 Условное отображение зависимости величины рассеянного глобулой радиосигнала от угла рассеяния (а) и соответствующей диаграммы направленности глобулы (б).



Процесс рассеяния радиоволн глобулами поясняется с помощью рис. 5.13. На рис. 5.13 показана глобула (Гл), находящаяся в электрическом поле плоской падающей волны, посылаемой антенной передатчика станции А. Так как глобула характеризуется диэлектрической неоднородностью относительно окружающей ее среды, величина возникающих в ней токов смещения несколько отлична от токов смещения в окружающем пространстве. Поэтому переизлучение энергии областью пространства, в котором размещена глобула, происходит не только в направлении проходящей волны, являющемся продолжением направления падающей волны, но и в стороны под некоторыми углами (рис. 5.13). Главным является тот факт, что рассеяние в стороны ничтожно мало по сравнению с переизлучением "вперед" и чрезвычайно быстро уменьшается с увеличением угла рассеяния  $\theta_r$ , т.е. в направлении точки расположения антенны станции Б, находящейся на поверхности земли, эффект рассеяния существенно ослаблен несмотря на то, что реальные значения угла рассеяния в направлении на точку Б составляют (см. таб. 5.1) единицы и даже десятые доли градуса. На рис. 5.13б изображена диаграмма направленности (ДН) глобулы, характеризующаяся сильной вытянутостью, гораздо большей, чем это условно представлено на чертеже. Уровень переизлучения в направлении станции Б характеризуется положением точки 1 на диаграмме направленности.

Нетрудно представить, что, поскольку в пространстве диаграмма направленности есть тело вращения вокруг направления падающей волны плоской фигуры, показанной на рис. 5.13б, минимальным значением угла рассеяния  $\theta_p$  для находящейся на поверхности земли станции Б будет лишь в том случае, если антенна станции Б находится в вертикальной плоскости, проходящей через антенну станции А и данную глобулу.

Именно этим и объясняется острая направленность максимума процесса рассеяния и вытекающее отсюда требование точной встречной ориентации антенн станций А и Б.

Наиболее эффективно при условии равных перепадов величины  $N$  рассеивают глобулы, поперечник которых приблизительно определяется величиной:

$$h_{сл} = \lambda / \theta_p \text{ (град)}$$

Суммарное поле рассеяния в точке Б характеризуется вектором  $E_p$ , представляющим собой сумму векторов  $E_i$ , отображающих компоненты рассеяния в точку Б от  $n$  неоднородностей, находящихся в данный момент в объеме рассеяния  $Q$ :

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5.21)$$

Так как число  $n$  неоднородностей типа глобул в объеме  $Q$  велико и непостоянно (особенно при боковом ветре) и, кроме того, изменяются их интенсивности, размеры и взаимное расположение внутри объема  $Q$ , то в выражении 5.21 случайным образом изменяются, как само число  $n$ , так и модули, и фазы компонента  $E_i$ , оказываются непостоянными во времени значения модуля и фазы вектора  $E_p$ . Значения фазы этого вектора распределены равномерно в пределах  $0-2\pi$ , а значения модуля - по случайному закону, который, вообще говоря, не определяется однозначно. Среднеквадратичное значение модуля величины  $E_p$  определяет уровень рассеяния, который в очень сильной степени зависит от точности встречной ориентации антенн и высоты расположения объема рассеяния, влияющих на величины углов рассеяния. а также от размера объема рассеяния. При этом существует понятие оптимального размера объема рассеяния, обеспечивающего максимум переизлучения, поскольку при дальнейшем его увеличении глобулы, находящиеся в верхней части объема, рассеивают энергию под существенно большими углами, т.е. неэффективно. Установлено, что величина  $[E_p]^2$  обратно пропорциональна 4-й и 5-й степени минимального угла  $Q_p$ , показанного на рис .5.3.

Процесс отражения радиоволн слоистыми неоднородностями иллюстрируется рис .5.14. Вследствие более существенного скачка величины  $N$  на границах слоя, малости угла падения  $\varphi_{\text{пад}}$  (т.е. угла встречи, примерно равного  $Q_p/2$ ) и больших горизонтальных размеров слоя, от его нижней и верхней границ возникают отраженные волны под углами  $\varphi_{\text{отр}} = \varphi_{\text{пад}}$ .

В этом случае интенсивность отраженных слоями волн оказывается существенно выше интенсивности волн, рассеиваемых глобулами. При равной контрастности по величине  $N$  наиболее сильный эффект отражения наблюдается от тех слоев, для которых волны, отраженные от верхних и нижних границ (5.14а), совпадают по фазе. Очевидно, что для некоторых реальных значений угла это определяется соотношением между толщиной слоя и длиной глобулы.

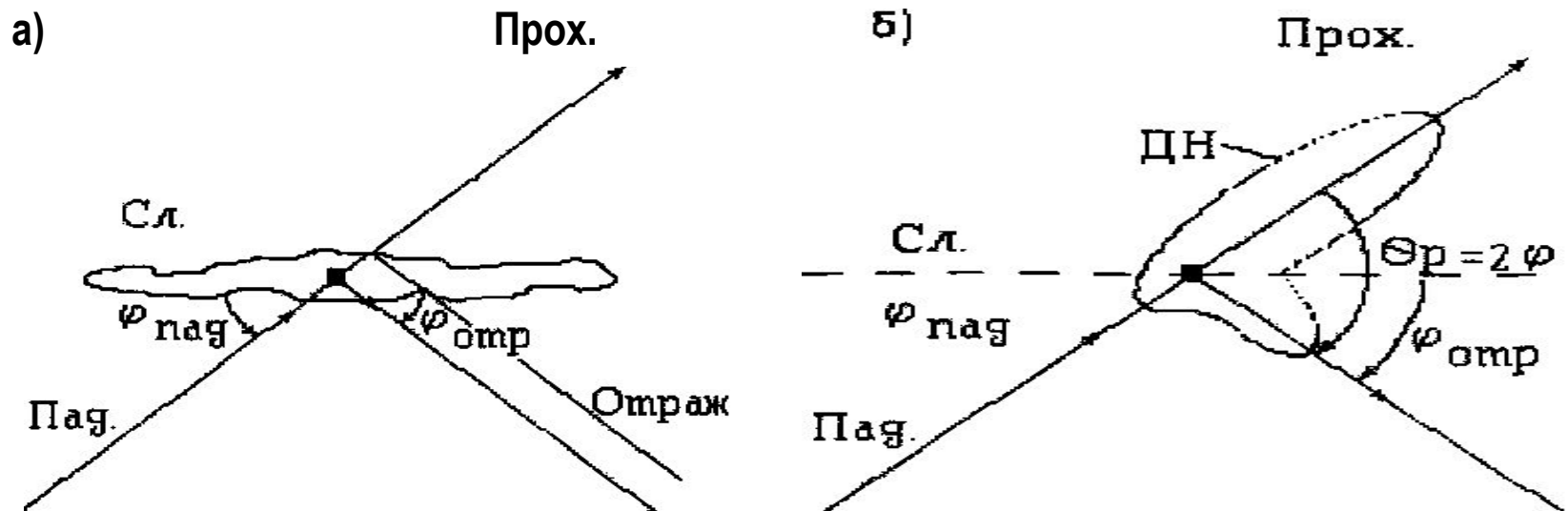


Рис .5.14. Процесс переизлучения и отражения радиосигнала слоистой неоднородностью (а) и соответствующая диаграмма направленности отражения от слоя (б) .

Наибольшее отражение дают слои, толщина которых:  $h_{\text{сл}} = \lambda / \theta_p$  (град)

Диаграмма направленности ДН отражения (и рассеяния) волн от слоистых неоднородностей имеет лепесток, направленный под углом  $\varphi_{\text{отр}}$  (рис.5.14б). Суммарное электрическое поле в точке Б, обусловленное отражением от слоев, может быть представлено вектором  $E_{\text{с}}$ , определяемым суммой, подобной (5.21). Однако в этом случае число  $n$  составляет единицы (или может быть равно нулю), а компоненты  $E_i$  - более интенсивны, но также характеризуются случайностью и некоррелированностью модулей и фаз. Интерферентность компоненты  $E_i$ , несмотря на неотнормально малую абсолютную и относительную подвижность слоев, может приводить к существенным и быстрым изменениям модуля и фазы вектора  $E_{\text{с}}$ , что объясняется относительной малостью длин волн (дециметры, сантиметры). Рассеяние волн глобулами и отражение волн слоями характеризуется многолучевостью, при которой фазовые углы компоненты  $E_i$  случайны и практически некоррелированы. Поэтому теории ДТР УКВ, основанные на учете рассмотренных механизмов, получили название некогерентных. Процесс отражения волн всей толщей тропосферы поясняется с помощью рис. 5.15. Поскольку плотность толщи тропосферы монотонно убывает с увеличением высоты, это вызывает диффузное "отражение", т.е. рассеяние волн. Если представить, что вся толща тропосферы разбита на  $n$  слоев толщиной  $\Delta h$  и внутри каждого слоя значение индекса преломления  $N_i$  постоянно, а на границах слоев оно претерпевает скачок на величину  $\Delta N = N_k - N_{k+1}$ , то от границ слоев должны возникать отраженные лучи, сходящиеся в точку Б. Из такой модели исходят когерентные теории ДТР УКВ, название которых объясняется постоянством сдвигов фаз между отраженными компонентами в точке Б. Реально слои, показанные на рис. 5.15 отсутствуют, т.е. можно предположить, что их число бесконечно, а толщина близка к нулю и, следовательно, число отраженных компонент также бесконечно, а интенсивность их ничтожно мала.

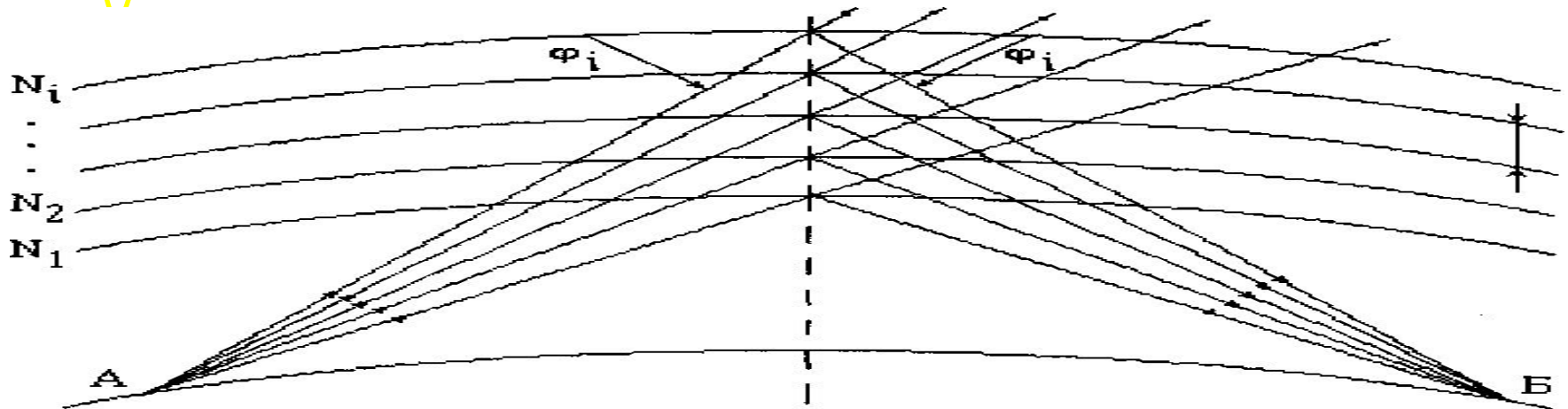


Рис. 5.15. Пояснение модели процесса переизлучения радиосигнала всей толщей тропосферы согласно когерентным теориям.

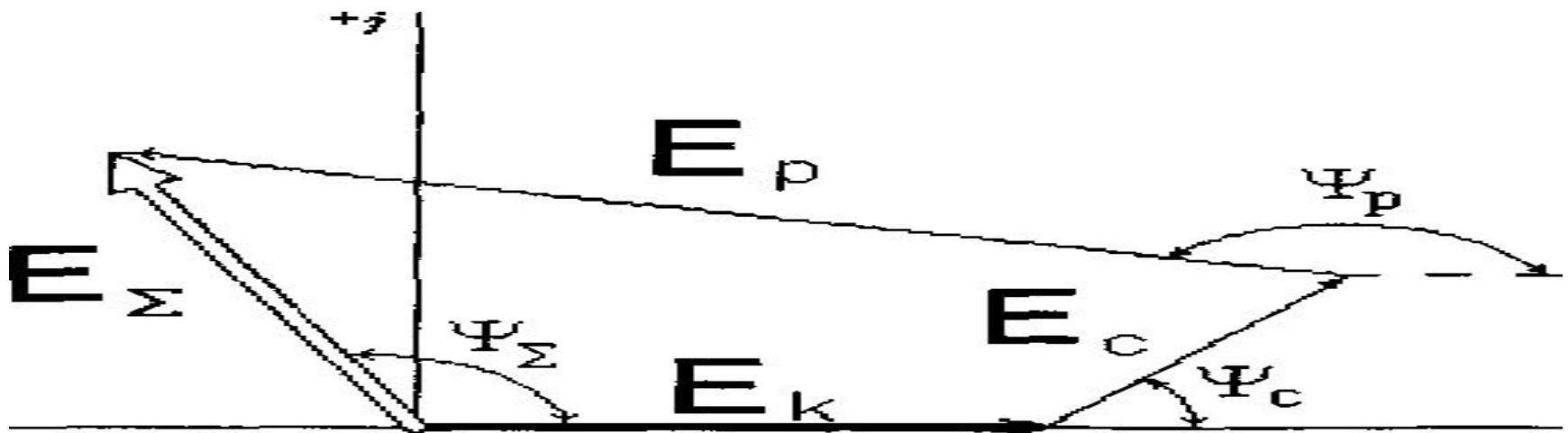


Рис. 5.16. Формирование вектора напряженности электрического поля при ДТР УКВ как суммы трех основных составляющих.

Таким образом, суммарное поле в точке Б (рис .5.16) может быть представлено суммой трех векторов:

$$E_{\Sigma} = E_p + E_c + E_k \quad (5.22)$$

Когерентная компонента  $E_k$  присутствует всегда и флюктуирует относительно слабо. Обычно к ней приплюсовывают и дифракционную компоненту электрического поля. Компоненты  $E_p$  и  $E_c$  являются основными, причем компонента  $E_c$  более интенсивна, но в принципе может отсутствовать. Вектор суммарного поля  $E_{\Sigma}$  характеризуется случайным, практически равномерным распределением фазы и сложными по структуре замираниями модуля. При уменьшении интервалов до протяженностей меньше 90-100 км дифракционная компонента поля быстро возрастает и превалирует над суммой компонент поля ДТР УКВ (см. формулу 5.22), интервал из тропосферного переходит в закрытый радиорелейный.

### 2.3. Особенности дальнего тропосферного рассеяния УКВ, оказывающее влияние на построение тропосферных линий.

ДТР УКВ сопровождается значительными потерями энергии. Только небольшая часть излучённой передающей антенной энергии попадает на приемную антенну. Ослабление энергии в диапазоне при дальностях связи 120-300 км, в среднем в  $10^{19}$ - $10^{26}$  раз или 190- 260 дБ. Выразить в децибелах величину отношения мощностей (энергии)  $M$  или напряжений означает определить ее десятичный логарифм и умножить в первом случае на десять (т.е. 101), а во втором случае на 20 (т.е. 201).

Введение децибел упрощает расчеты, так как позволяет заменить операции перемножения и деления чисел натурального ряда сложением и вычитанием чисел, выраженных в децибелах. В технике связи часто пользуются и другими логарифмическими величинами - неперами. Между непером и децибелом существует следующая зависимость:

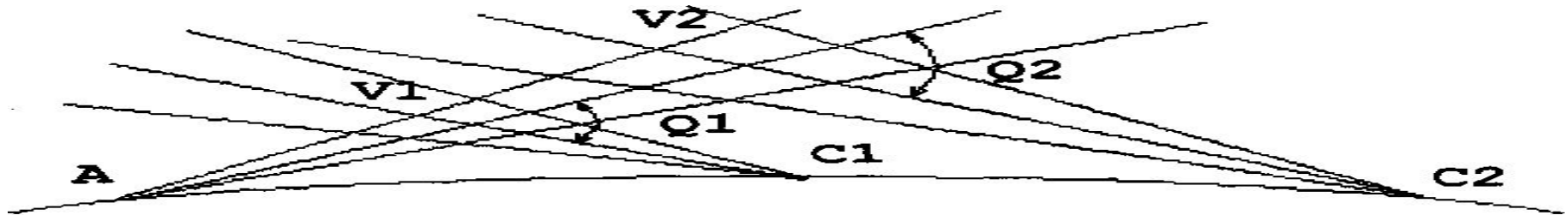
$$P[\text{дБ}] = 10 \lg (P_1 / P_0)$$
$$P[\text{Нп}] = 1/2 \log (P_1 / P_0)$$

Общие потери энергии разделяют на потери при распространении радиоволн в свободном пространстве и на дополнительные потери, вызываемые влиянием земли и тропосферы. Ниже рассмотрены основные факторы, влияющие на величину дополнительных потерь.

**а) Зависимость уровня сигнала от протяженности трассы и угла закрытия.**

На трассах тропосферных радиорелейных линий при дальностях свыше 100 км медианные значения дополнительных потерь (наблюдаемые в 50% времени) монотонно возрастают с расстоянием, причем скорость возрастания составляет около 7 дБ на 100 км. С учетом затухания в свободном пространстве погонное ослабление на трассах протяжённостью до 150 км составляет примерно 1,1 дБ на 10 км, а на расстояниях от 150 до 1000 км увеличивается до 1.6 дБ на 10км. Быстрое убывание поля с расстоянием можно объяснить двумя причинами. При тропосферном распространении радиоволн, удлинение трассы эквивалентно увеличению угла рассеяния.





Зависимость угла рассеяния от протяженности трассы.

При рассеянии «вперед», когда основная часть энергии поля рассеивает в направлениях, близких к прямому распространению волн, большие углы рассеяния соответствуют малой интенсивности поля. Кроме того, чем больше протяженность трассы, тем на больших высотах располагается рассеивающий объем. По современным представлениям, интенсивность турбулентности тропосферы, а следовательно, и ее рассеивающие свойства уменьшаются по мере удаления от поверхности земли. Поэтому, несмотря на увеличение рассеивающего объема ( $V$ ), интенсивность поля уменьшается по мере увеличения расстояния. К уменьшению интенсивности поля приводит и увеличение угла закрытия на трассе. Угол закрытия определяется высотой препятствий в направлении на корреспондента и считается положительным, когда препятствие закрывает горизонт, и отрицательным, когда антенна расположена на возвышенностях рельефа. Дополнительные потери от рельефа местности имеют место только при положительном суммарном угле закрытия и составляют примерно 2,3 дБ. на каждую  $0,1^\circ$  суммарного угла закрытия (на трассах длиной до 200 км.)

### **б) Зависимость уровня сигнала от частоты.**

Зависимость дополнительных потерь от длины волны носит случайный характер и меняется в широких пределах со средним значением, примерно пропорциональным длине волны в первой степени.

С повышением частоты наблюдается некоторое уменьшение напряженности поля.

Относительно малая зависимость уровня поля от частоты может иметь место из-за того, что в тропосфере имеются неоднородности различных размеров, а изменение диэлектрической проницаемости в этих неоднородностях не зависит от частоты.

Все же при выборе частоты необходимо учитывать, что работа на более высоких частотах соответствует большему ослаблению на трассе.

### **в) Зависимость уровня сигнала от времени суток и года.**

Суточный ход уровня сигнала чаще всего наблюдается в летний период года. При этом средние значения сигнала обычно несколько повышаются в ночные и утренние часы. Сезонные колебания среднего уровня сигнала выражены сильнее. Летом среднемесячные уровни сигнала выше, чем зимой. Наиболее высокие уровни поля наблюдаются в июне - июле, а наиболее низкие в декабре - феврале. Величина сезонных изменений напряженности поля на трассах протяженностью 150-300 км в среднем составляет 8-12 дБ и с дальнейшим увеличением расстояния уменьшается.

### г) Колебания уровня сигнала от часа к часу

На больших расстояниях за радиогоризонтом наблюдаются медленные колебания уровня поля от часа к часу. Эти колебания происходят одновременно на различных частотах. Медленные колебания поля связаны с изменениями сред них уровней рефракции на трассе.

### д) Зависимость уровня сигнала от метеорологических и климатических условий.

Уровень принимаемого сигнала определенным образом связан с условиями погоды, в основном с типом циркуляции атмосферы. В антициклональных условиях (обычно при ясно или малооблачной погоде) уровень принимаемого сигнала выше, а в циклональных (сплошная облачность, осадки) ниже средних значений, при прохождении над трассой метеорологических фрон-тов уровень принимаемого сигнала, как правило, снижается. Большое влияние на уровень принимаемого сигнала оказывают климатические условия. Установлено, что морской климат благоприятствует ДТР, а континентальный приводит к уменьшению интенсивности рассеяния и к снижению уровня сигнала. При неблагоприятных условиях погоды среднее увеличение потерь по сравнению со среднемесячным составляет: при прохождении теплового фронта 6-7 дБ, холодного фронта 5 дБ и во время антициклона 4-5дБ.

### е) Уменьшение эффективного усиления антенн.

Расчеты коэффициента усиления и диаграммы направленности антенн при заданных ее размерах ведутся в предположении, что электромагнитное поле, воздействующее на антенну, имеет плоский волновой фронт в пределах рабочей поверхности антенны. Случайные флуктуации в рассеивающем объеме могут привести к тому, что колебание поля в пределах раскрыва антенн будут между собой не связаны, синфазность волнового фронта нарушается. Это приведет к уменьшению коэффициента усиления антенны, что эквивалентно некоторому расширению диаграммы направленности. Для работы на больших расстояниях за радиогоризонтом весьма желательно применение антенн с высоким коэффициентом усиления, так как уровень поля на этих линиях очень низкий.

### ж) Замирание сигнала.

Замираниями называются непрерывные колебания уровня принимаемого сигнала. Глубина замирания определяется отклонением мгновенных значений уровня сигнала от среднего уровня. Оно может достигать 20 дБ, а иногда и 30 дБ. Различают быстрые замирания с периодами от долей секунд до нескольких минут и медленные замирания с периодом больше нескольких минут. Под медленными замираниями подразумевают, кроме того, флуктуации средних за 5 или 10 минут, а также среднечасовых значений сигнала. Опыты показали, что частота замираний изменяется, примерно обратно пропорционально длине волн.

Частота замираний имеет суточную закономерность: днем, в часы полудня, она наибольшая. Предполагают, что это связано с дневным метеорологическим циклом. Частота замираний зависит не только от величины рабочей волны и времени суток, но и от длины трассы. На длинных трассах частота замираний больше, чем на более коротких. Быстрые замирания появляются в результате сложения в точке приёма многих компонентов поля, приходящих от различных неоднородностей с разными амплитудами и фазами. Медленные замирания возникают в основном за счет изменения числа интенсивности переизлучающих неоднородностей и за счет изменения средних условий рефракции (искривление траектории) радиоволн. Наличие быстрых и глубоких замираний приводит к необходимости принятия специальных мер по повышению устойчивости связи на тропосферных радиорелейных линиях. Для борьбы с быстрыми замираниями применяют различные способы разнесённого приёма (главным образом, разнесение антенн в пространстве и разнесение несущих частот с последующим сложением сигналов по низкой частоте). В частности, используют счетверенный прием, в котором прием ведется на две антенны на одной частоте. При этом каждая антенна принимает два сигнала взаимоперпендикулярной поляризации .



Взаимная развязка двух сигналов обеспечиваемая за счет использования сигналов горизонтальной и вертикальной поляризации, а также разнесение антенн в пространстве обеспечивает прием четырёх некоррелированных (статистически независимых) сигналов. В тропосферных радиорелейных линиях связи применяют, главным образом, разнесение антенн в направлении, перпендикулярном направлению трассы. Для статистической независимости сигналов разнесения антенн должно выбираться не менее (70-100) А.

### 3. Методы разнесенного приема (передачи) сигналов - 25 мин.

Характерная особенность построения ТРС состоит в применении методов разнесённого приема (передачи), позволявших бороться с быстрыми замираниями и резко улучшающих качество связи в условиях быстрых замираний. Благодаря применению разнесенного приема снижают уровень и пикфактор шумов в каналах, что повышает разборчивость телефонных сообщений и достоверность передачи бинарной информации. Расширяется полоса пропускания среда распространения сигналов, линейность фазовой характеристики в пределах этой полосы и, следовательно появляется возможность передачи более широкополосных радиосигналов, а также передачи дискретной информации с более высокими скоростями путем непосредственной манипуляции несущего колебания методами ЧМ и ОФМ:

колебания методами ЧМ и ОФМ

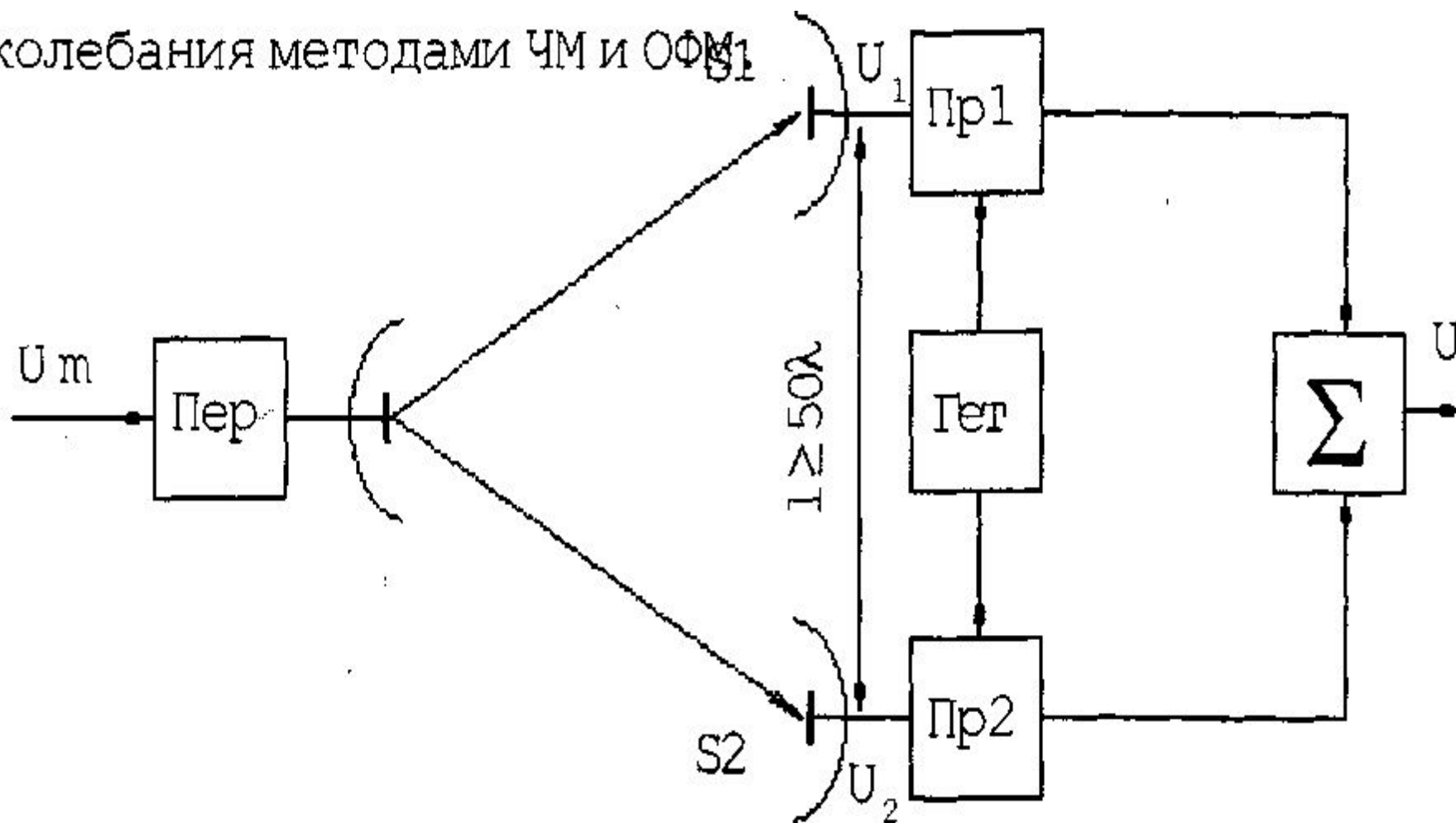


рис. 5.5. Пояснение метода пространственного разнесения сигналов.

Сущность разнесенного приема (передачи) заключается в осуществлении тем или иным способом нескольких обычно (двух-четырех) путей прохождения радиосигнала (разнесенных ветвей), быстрые замирания в которых оказываются взаимно некоррелированными. Сложение сигналов, прошедших по таким путям (разнесенным ветвям) дает определённый выигрыш качества, зависящий от кратности разнесения и метода сложения.

### 3.1. Метод пространственного разнесения радиосигналов (рис.5.6).

Из рисунка видно, что на приёмной стороне имеются две (или более) антенны, разнесенные одна от другой в направлении, перпендикулярном направлению корреспондента. К каждой антенне подключён отдельный приемник (усилительный тракт). Поскольку антенны пространственно разнесены, получаемые на их выходах и подводимые ко входам приемников радиосигналы  $S_1$  и  $S_2$  характеризуются несовпадением мгновенных значений огибающих  $U_1$  и  $U_2$  и фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Чем больше величина пространственного разнесения антенн  $1$ , тем этот эффект ярче выражен. При некотором разнесении  $1 \approx 1_0$  значения  $U_1$  и  $U_2$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  оказываются некоррелированными. Величина называемая радиусом пространственной корреляции, зависит от коэффициентов усиления антенн, протяженности интервала и диапазона частот. В практике подвижных военных ТРЛ обычно обеспечивают разнесение антенн на расстояние  $1 \geq 50\lambda$ , полагая при этом, что такая величина мало отличается от значения  $1_0$ , при котором коэффициент корреляции огибающих  $U_1$  и  $U_2$  составляет  $1/L=0,37$ .



Преимуществом рассматриваемого метода является минимальный расход частот связи, такой же как и при отсутствии разнесенного приема, что особенно важно для военных ТРЛ. Кроме того, (см. рис .5.6) на два приемника требуется только один общий гетеродин (синтезатор частот). Недостаток метода - необходимость применения двух (нескольких) антенн, а в дециметровом диапазоне - соответственно такого же числа антенных опор, поскольку, требуемая величина разнесения антенн велика и, например, при  $\lambda=0,5$  м составляет  $1 \geq 50 \times 0,5 = 25$  м. При этом методе один и тот же сигнал одновременно передается на различных несущих частотах  $f_1$  и  $f_2$  (при двухкратном частотном разнесении). Разделение сигналов на стороне передачи и приема осуществляется с помощью разделительных фильтров РФ1 и РФ2, пропускающих сигналы соответственно на несущих частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Сигналы  $S_1$  и  $S_2$ , а следовательно, и их огибающие  $U_1$  и  $U_2$  и фазы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , оказываются некоррелированными, если разнесение частот

$$\Delta f = [f_1 - f_2] \geq \Delta f_0$$

где  $\Delta f_0$  - радиус частотной корреляции.

Радиус частотной корреляции уменьшается с увеличением размера объема рассеяния, т. е. снижением направленности антенн. Для подвижных военных ТРЛ полагают  $\Delta f_0 \approx 1,5 \div 2$  МГц. Преимуществом метода частотного разнесения является отсутствие необходимости увеличения числа антенн, а в дециметровом диапазоне и количества антенных опор. Существенны недостатки метода - увеличение числа частот связи, отдельных настроенных на различные частоты радиопередающих и радиоприёмных устройств, и, следовательно, увеличение числа синтезаторов частот либо соответствующее усложнение их конструкции.

### 3.3. Методы комбинированного разнесения.

Для увеличения кратности разнесения применяют комбинирование методов разнесенного приема (передачи), чем достигается конструктивный и экономический выигрыш. В качестве примеров рассмотрим использование на подвижных военных ТРЛ методов комбинированного разнесения. Наиболее широко в настоящее время применяется метод 4-кратного пространственного разнесения при 2-кратном разнесении на стороне приема, при 2-кратном разнесении на стороне передачи и при различении передаваемых сигналов по поляризации волн. Метод основан на свойстве УКВ практически полностью сохранять поляризацию волн в процессе ДТР УКВ. Благодаря этому на стороне приема различают сигналы, переданные с вертикальной (ВП) и горизонтальной (ГП) поляризацией волн. Принцип построения такой системы разнесения можно пояснить с помощью рис .5.7. На стороне передачи один и тот же радиосигнал с двух выходов одного и того же передатчика поступает по фидерам к разнесенным антеннам, на выходах которых включены поляризаторы волн, причем одна антенна излучает сигнал с вертикальной поляризацией волн, а другая - с горизонтальной. На стороне приема также имеются две разнесенные в пространстве антенны, каждая из которых принимает сигналы, переданные как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризацией. Разделение сигналов с различной поляризации осуществляется с помощью поляризационных селекторов (на рис. 5.7 не показаны).



Таким образом, один и тот же сигнал на одной и той же несущей частоте  $f_l$  передается по четырем разнесенным в пространстве ветвям. Все четыре сигнала  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  на стороне приема характеризуются взаимно некоррелированными огибающими  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  и взаимно некоррелированными фазами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ . Сложение таких сигналов в приемнике обеспечивает высокую эффективность приёма в условиях быстрых замираний. Основное преимущество этого способа, особенно важное для подвижных военных ТРЛ, заключается в минимальном расходе частот связи, так как передача сигналов по всем ветвям осуществляется на одной и той же несущей частоте. Кроме того, 4 - кратное разнесение обеспечивается только при двух антеннах, входящих в комплект ТРС.

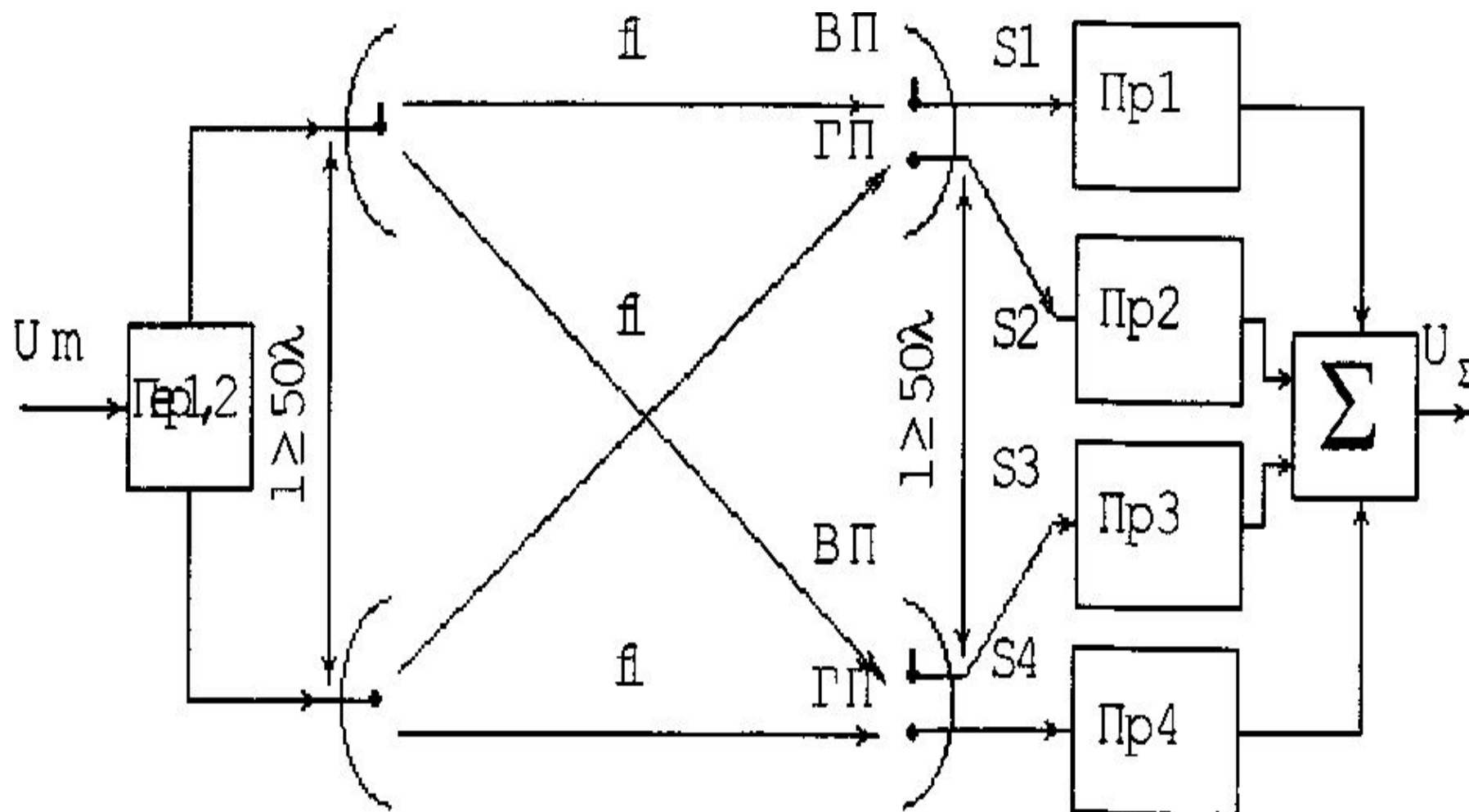


рис .5.7. Пояснение метода пространственного разнесения сигналов с различием их по поляризации волн.



Комбинированный пространственно-частотный метод разнесения иллюстрируется рис. 5.8, где показан пример 4 - кратного разнесения при 2 - кратном пространственном и 2 - кратном частотном разнесении. Один и тот же модулируемый сигнал поступает на два различных передатчика, несущие частоты  $f_1$  и  $f_2$ , которых различаются на величину не менее чем, соизмеримую с радиусом частотной корреляции. На стороне приема имеются две разнесенные антенны, каждая из которых принимает сигналы на разнесенных частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Сигналы разделяются фильтрами и усиливаются четырьмя приемниками, попарно настроенными на частоты  $f_1$  и  $f_2$ . Сигналы, полученные на выходах приемников, суммируются.

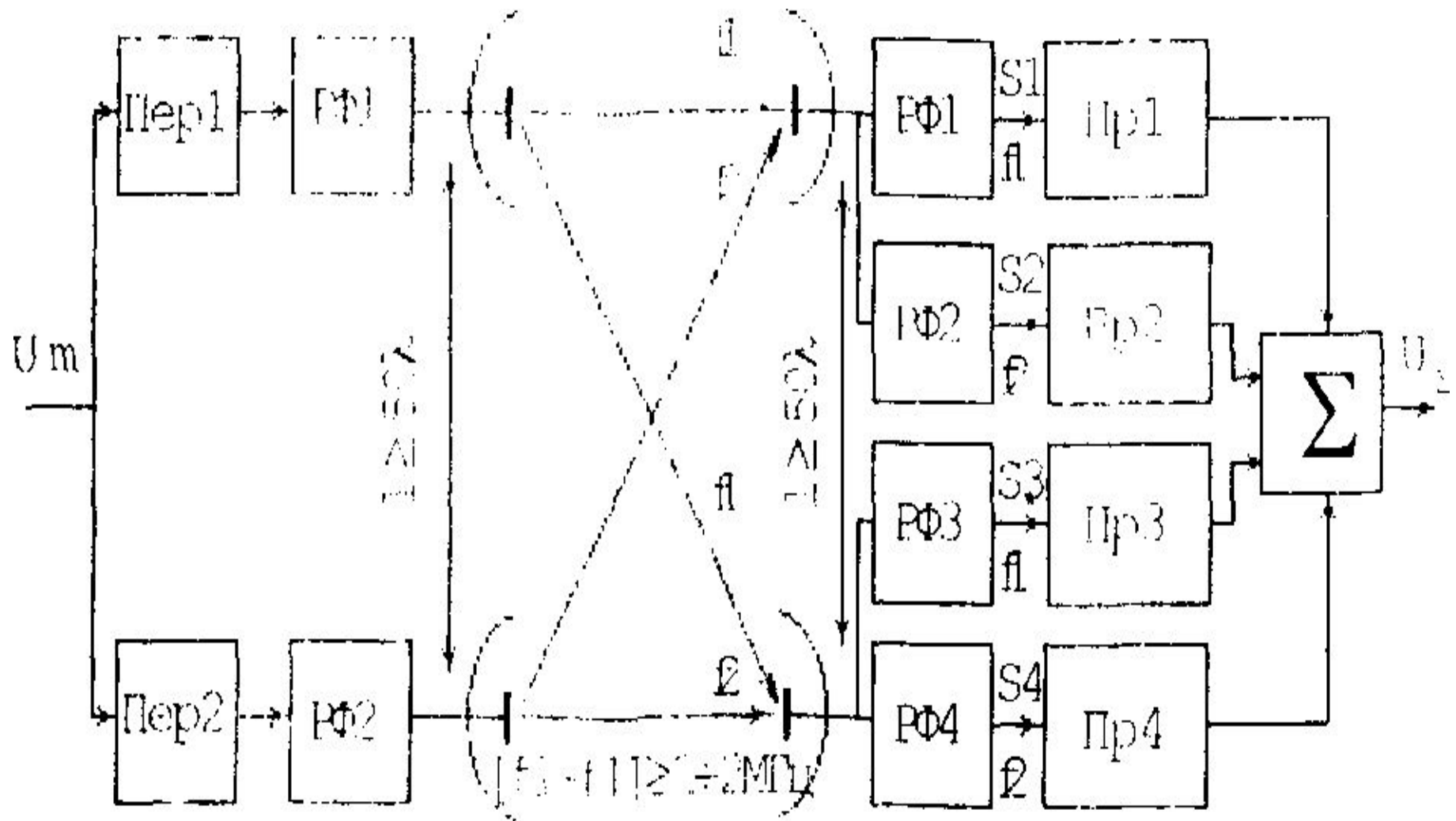


рис .5.8. Пояснение метода комбинированного пространственно-частотного разнесения сигналов.

### **ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ - 5 мин.**

- 1. Подвести итог занятия.**
- 2. Объявить оценки, полученные студентами в ходе занятия.**
- 3. Дать задание на самоподготовку:**
  - изучить принцип тропосферной связи;**
  - изучить методы разнесенного приема ( передачи) сигналов.**



Занятие  
закончено