

следования позволили классифицировать сигналы С. р. р. по след. типам: прямые сигналы (ПС) — длина радиотрассы D от 10 до 20 тыс. км; антиподные сигналы (АС) — $D \sim 20$ тыс. км; обратные сигналы (ОС) — $20 < D < 40$ тыс. км; кругосветные сигналы (КС) — $D \sim 40$ тыс. км; кратные кругосветные сигналы (КС_н) — $D \sim 40n$ тыс. км. К сигналам С. р. относят также задержанные сигналы, эхосигналы с многосекундными задержками (ЗС).

Прямые и обратные сигналы. При расстоянии между корреспондентами $\sim 10-15$ тыс. км в суточном цикле наблюдается резкий переход от кратчайшего пути (ПС) к обратной трассе (ОС). При этом предпочтительной является трасса, большая часть к-рой лежит в ночном полушарии. Реверс передающей и приёмной антенн на таких трассах способствует повышению надёжности связи.

Антиподные сигналы (АС) соответствуют макс. разности излучателя и приёмника на Земле, когда потенциально возможны любые направления прихода радиоволн. Из-за неоднородности ионосферы вблизи антипода формируется фокальное пятно размером $\sim 0,5-1,5$ тыс. км с неск. направлениями прихода и сложным пространственным распределением напряжённости поля. Это явление аналогично *аберациям оптических систем*. Оптим. условия приёма АС реализуются на трассах, лежащих в ночном полушарии и в окрестности терминатора (линия, отделяющая дневное полушарие от ночного). АС меньше др. типов сигналов подвержены влиянию ионосферно-магн. возмущённости и поглощению в полярных зонах.

Кругосветные сигналы (КС). Оптим. трассы тяготеют к сумеречной зоне, составляя обычно с терминатором угол $10-20^\circ$. Наилучшие условия приёма КС зимой в дневное время, неск. хуже — в ночное время летом и днём в равноденствие. Амплитуда КС практически не меняется при реверсе передающей и приёмной антенн. С ростом солнечной активности приём КС улучшается. Диапазон рабочих частот $f = 10-30$ МГц с оптим. частотами порядка $15-22$ МГц. Осн. особенностями КС являются стабильность времени распространения (138-140 мс), наличие оптим. азимута, ортогонального направлению на подсолнечную точку (см. *Магнитосфера Земли*). Более точные условия приёма КС сводятся к след. эмпирич. правилам: критич. частота F -слоя ионосферы в районе излучателя и его антипода $f_{кр} \geq f/3$; траектория КС близка к большому кругу, на к-ром достигается максимум минимума $f_{кр} F^2$ и минимуму продольных градиентов электронной концентрации. При связи между ИСЗ, орбиты к-рых проходят ниже максимума F -слоя, диапазон наблюдаемых частот расширяется до 40 МГц и вероятность приёма дальних радиосигналов значительно увеличивается.

Кратные кругосветные сигналы (КС_н). Оптим. условия приёма КС_н, как и КС, соответствуют сближению трасс с терминатором. КС_н принимаются в периоды высокого уровня КС. Обращает на себя внимание исключительно низкое затухание КС_н — порядка 5-20 дБ на один обход.

Задержанные сигналы (ЗС). Радиозго с задержками в единицы и десятки секунд (т. е. на 1-2 порядка большими, чем у КС) наблюдается гораздо реже, чем КС. В ряде случаев оптим. условия приёма ЗС также связаны с терминатором и отмечается кратность их задержек задержкам КС.

Извление С. р. р. наиб. характерно для коротких (декаметровых) волн в диапазоне $f \sim 10-25$ МГц. Волны более низкой частоты испытывают значит. поглощение в ионосфере, а их излучение требует радиопередающих устройств большой мощности и громоздких антенн. Для УКВ и более коротких радиоволн, как правило, рефракция в ионосфере недостаточна для формирования устойчивого волнового канала. Предель-

ная частота вырождения (разрушения) волновода определяет верх. границу частотного диапазона С. р. р.

Для С. р. р. всех типов можно отметить ряд общих свойств. Диапазон оптим. частот расширяется в годы высокой солнечной активности. Вертикальные углы прихода радиоволн лежат в пределах $5-20^\circ$ от горизонта. Для трасс длиной порядка $15-20$ тыс. км азимутальный угол прихода меняется плавно со временем, значительно отклоняясь в переходные периоды от дуги большого круга.

Механизмы сверхдальнего распространения радиоволн. Осн. способом С. р. р. декаметровых радиоволн является смешанный механизм распространения, включающий в себя скачковый (последоват. отражение радиоволн от поверхности Земли и ионосферы) и волноводный способы распространения. Приближённые ф-лы для диэлектрич. проницаемости

$$\epsilon_0 = 1 - 4\pi e^2 N_e / m(\omega^2 + \nu^2)$$

и проводимости плазмы

$$\sigma \approx e^2 N_e \nu^2 / m(\omega^2 + \nu^2),$$

где $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, m — масса электрона, позволяющие оценить частотно-угл. диапазон волн, удерживаемых в волноводе Земля — ионосфера, и их поглощение. Слабее всего затухают волны высокой частоты, распространяющиеся в приподнятом волновом канале, формирующемся ниже максимума F -слоя за счёт сферичности Земли и рефракции радиоволн в расслоённой ионосфере (рис. 1). Такими волноводно-рикошетирующими модами осуществляется сверхдальняя связь между ИСЗ. Малое погонное затухание КС и КС_н говорит о том, что реализуется волноводный механизм распространения. Оценки показывают, что ионосферный волновод возбуждается с Земли за счёт регулярных горизонтальных градиентов ионосферы, рассеяния на случайных неоднородностях и дифракц. эффектах.

Геом. оптика распространения радиоволн в трёхмерно-неоднородной ионосфере подобна динамике частицы в медленно меняющемся потенциальном поле. В первом приближении вертикальная проекция лучевой траектории $r(s)$ даётся ур-нием

$$\frac{1}{R} \int \frac{\partial Q}{\partial l} \frac{ds}{\sqrt{Q}} = \pm \frac{\partial Q}{\partial l} \int \frac{dr}{r\sqrt{\epsilon-Q}} \quad (1)$$

Здесь $r = R + z$ — расстояние от центра Земли, R — радиус Земли, s — расстояние вдоль земной поверхности; $\epsilon = (r^2/R^2)\epsilon_0(r, \theta, \varphi)$ — модифициров. диэлектрич. проницаемость, а $Q = Q(\theta, \varphi)$ — медленно меняющаяся ф-ция географич. координат, определяемая из условия сохранения адиабатич. инварианта:

$$I = \int_r^{\mp} \sqrt{\epsilon - Q} dr / r = \text{const} \quad (2)$$

(здесь r, r^\mp — точки поворота луча). Ф-лы (1) и (2) учитывают горизонтальную неоднородность ионосферы и позволяют проследить переход от скачкового механизма к волноводному распространению и обратно (рис. 2). Ф-ция $Q = \cos^2 \beta$ определяет вертикальный угол прихода β для скачковых траекторий; для волноводно-рикошетирующих траекторий $Q > 1$. Её максимум достигается на предельной рабочей частоте

$$f_{\text{макс}} = \frac{c}{\sqrt{\pi m}} \sqrt{N_e(r_0) + (r_0/2)dN_e(r_0)/dr} \quad (3)$$

вырождающегося ионосферного волновода на уровне $r = r_0$, определяемом из ур-ния

$$dN_e(r_0)/dr + (r_0/3)d^2N_e(r_0)/dr^2 = 0 \quad (4)$$