

Т. о., нелинейные эффекты становятся заметными, когда поле волны  $E$  сравнимо с  $E_p$ ,  $k$ -рое в зависимости от частоты волны и области ионосферы составляет  $\sim 10^{-4} - 10^{-1}$  В/см.

Нелинейные эффекты могут проявляться как самовоздействие волны и как взаимодействие волн между собой. Самовоздействие мощной волны приводит к изменению её поглощения и глубины модуляции. Поглощение мощной радиоволны нелинейно зависит от её амплитуды. Частота соударений  $\nu$  с увеличением темп-ры электронов может как расти (в ниж. слоях, где осн. роль играют соударения с нейтральными частицами), так и убывать (при соударении с ионами). В первом случае поглощение резко возрастает с увеличением мощности волны («насыщение» поля в плазме). Во втором случае поглощение падает (т. н. просветление плазмы для мощной радиоволны). Из-за нелинейного изменения поглощения амплитуда волны нелинейно зависит от амплитуды падающего поля, поэтому её модуляция искажается (автомодуляция и демодуляция волны). Изменение  $n$  в поле мощной волны приводит к искажению траектории луча. При распространении узконаправленных лучков радиоволн это может привести к самофокусировке пучка аналогично самофокусировке света и к образованию волноводного канала в плазме.

Взаимодействие волн в условиях нелинейности приводит к нарушению суперпозиции принципа. В частности, если мощная волна с частотой  $\omega_1$  модулирована по амплитуде, то благодаря изменению поглощения эта модуляция может передаваться др. волне с частотой  $\omega_2$ , проходящей в той же области ионосферы (рис. 13) Это явление, называемое кросс модуляцией или Люксембург-Горьковским эффектом, имеет практич. значение при радиовещании в диапазоне ср. волн.

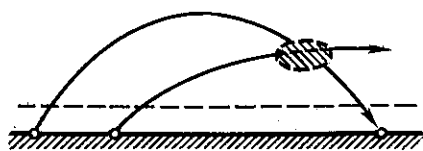


Рис. 13. Ионосферная кросс модуляция происходит в области пересечения лучей.

Нагрев ионосферы в поле мощной волны в КВ-диапазоне может вызвать тепловую параметрич. неустойчивость в ионосфере,  $k$ -рая приводит к аномально большому поглощению радиоизлучения и расслоению плазмы (см. Параметрический резонанс). В области резонанса  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_H^2}$  образуются сильно вытянутые вдоль  $H_0$  неоднородности ионосферы (с продольным масштабом 1 км, поперечным  $\sim 0,5 \div 100$  м),  $k$ -рые перспективны для дальней связи в диапазоне УКВ. В поле очень мощных радиоволн электроны столь сильно разогреваются, что возникает электрич. пробой газа.

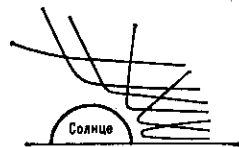
Если размеры возмущённой полем волны области плазмы много меньше длины свободного пробега электронов, нагревая нелинейность становится слабой. Это имеет место при коротких импульсах и узких пучках радиоволн. В этом случае осн. роль играет т. н. стрикционная нелинейность, связанная с тем, что неоднородное перем. электрич. поле волны оказывает давление на электроны, вызывающее сжатие плазмы. Концентрация электронов  $N$ , а следовательно,  $\epsilon$  и  $\sigma$  становятся зависящими от амплитуды поля. Стрикционная нелинейность приводит к изменению диэлектрич. проницаемости  $\Delta \epsilon_c \approx e^2 E^2 / 8 T m \omega^2$ , меньшей нагревного изменения  $\Delta \epsilon_n$  на неск. порядков (при той же мощности волны). Стрикционная нелинейность играет важную роль в параметрич. неустойчивости ионосферы.

Распространение радиоволн в космических условиях. За исключением планет и их ближайших окрестностей,

б. ч. вещества во Вселенной ионизована. Параметры космич. плазмы меняются в широких пределах. Напр., концентрация электронов и ионов вблизи орбиты Земли  $\sim 1 - 10$  см $^{-3}$ , в ионосфере Юпитера  $\sim 10^5$  см $^{-3}$ , в солнечной короне  $\sim 10^8$  см $^{-3}$ , в недрах звёзд  $\sim 10^{27}$  см $^{-3}$ . Из космич. пространства к Земле приходит широкий спектр эл.-магн. волн,  $k$ -рые на пути из космоса должны пройти через ионосферу и тропосферу. Через атмосферу Земли без заметного затухания распространяются волны двух осн. частотных диапазонов: «радиоокно» соответствует диапазону от ионосферных критич. частот  $\omega_{кр}$  до частот сильного поглощения аэрозолями и газами атмосферы (10 МГц — 20 ГГц), «оптич. окно» охватывает диапазон видимого и ИК-излучения (1—10 $^3$  ТГц). Атмосфера также частично прозрачна в диапазоне НЧ (<300 кГц), где распространяются свистящие атмосферерики и магнитогидродинамич. волны.

В космич. условиях источник радиоволн и их приёмник часто быстро движутся один относительно другого. В результате Доплера эффекта это приводит к изменению  $\omega$  на  $\Delta \omega = kv$ , где  $v$  — относит. скорость. Пони-

Рис. 14. Траектории радиолучей с  $\lambda = 5$  м в солнечной короне.



жение частоты при удалении корреспондентов (красное смещение) свойственно излучению удаляющихся от нас далёких галактик. Радиоволны в космич. плазме подвержены рефракции, связанной с неоднородностью среды (рис. 14). Напр., вследствие рефракции в атмосфере Земли источник радиоволн виден выше над горизонтом, чем в действительности. Для определения расстояния до пульсаров и при интерпретации результатов радиолокации Солнца и планет необходимо учитывать, что в космич. плазме  $v_{ф} \neq c$ .

Возможности радиосвязи с объектами, находящимися в космич. пространстве или на др. планетах, разнообразны и связаны с наличием и строением их атмосфер. Если космич. плазма находится в магн. поле (магнитосфера Юпитера, области солнечных пятен, магнитосферы пульсаров), то она является гиротропной средой, подобно земной ионосфере. Для всех планет с атмосферами общая трудность радиосвязи состоит в том, что при входе космич. аппарата в плотные слои атмосферы вокруг него создаётся плотная плазменная оболочка, затрудняющая прохождение радиоволн. На планетах типа Меркурия и Луны, практически не имеющих атмосферы и ионосферы, на Р. р. оказывает влияние только поверхность планеты. Из-за отсутствия отражения от ионосферы дальность связи вдоль поверхности такой планеты невелика (рис. 15) и может быть увеличена только при помощи ретрансляции через спутник.

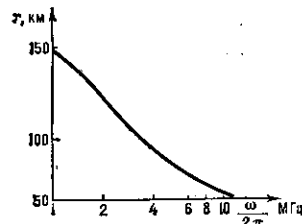


Рис. 15. Зависимость дальности  $r$  радиосвязи на поверхности Луны от частоты  $\omega/2\pi$ .

Распространение радиоволн разных диапазонов. Радиоволны очень низких (3—30 кГц) и низких (30—300 кГц) частот огибают земную поверхность вследствие волноводного распространения и дифракции, сравнительно слабо проникают в ионосферу и мало поглощаются