

Министерство образования и науки Российской Федерации  
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
КАФЕДРА РАДИОАСТРОНОМИИ  
Направление «120100.62-РАДИОФИЗИКА»  
Профиль «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В СРЕДАХ»

# Амплитудные и фазовые измерения ионосферы

Выполнил: студент гр 06-529  
Сахибуллин И.А.

Казань 2016

# Флуктуации амплитуды радиоволн при распространении в турбулентной атмосфере

- Коэффициент преломления ионосферы Земли испытывает флуктуации, вызванные турбулентными процессами в атмосфере. Этим объясняется рассеивание радиоволн флуктуации амплитуды. Естественно, это снижает качество радиосвязи и порой является ограничивающим фактором распространения радиоволн. Для дальнейших расчетов удобно использовать величину  $[58] / = \Delta E / E_0$
- Где  $E$  амплитуда поля,  $E_0$  амплитуда поля при отсутствии турбулентной среды. Из теории распространения радиоволн следует, что величина  $I$  распределена по нормальному закону с нулевым средним значением и среднеквадратичным значением

- $\langle I^2 \rangle = 2 n^2 k^2 L j^0 \int_0^1 s \Phi_{\Pi}^{(k)K} dx \quad (2.14)$
- $k$ - волновое число,  $L$ -расстояние пройденное волной  $\Phi_{\Pi}(\omega)$  - спектр флуктуаций коэффициента преломления.
- В ионосфере флуктуации коэффициента преломления обусловлены флуктуациями электронной плотности на достаточно больших высотах.
- $2ne^2 a_N \omega_n$
- $m \langle jL \rangle^2$
- $a_N$  — дисперсия флуктуации электронной плотности,  $e$ -заряд электрона,
- $L$
- $\omega$ - частота. Однако известно что величина  $\beta \gamma_n / N$  постоянная ( $\sim 10^{-7}$ ).
- Средний квадрат логарифма амплитуды:
- $2i^2$
- $\langle I^2 \rangle = \int f^2 / N^2(h) dh \quad (2.15)$
- Отсюда следует согласно расчетам [1] средняя амплитуда поля примет
- вид
- $\langle I^2 \rangle$ .
- $\langle E \rangle = E_0 \exp( - ) \quad (2.16)$

# Фазовые измерения

- Фазовым методом выполняются наиболее точные измерения. Расчетная инструментальная погрешность  $dP_u$  составляет около 0,01 от длины волны и при  $X = 19$  см
- $SP_U < 0,01\lambda = 0,01 \cdot 19\text{см} = 2\text{мм}$ . (118)
- Предположим, имеются идеальные условия - спутник относительно приемника неподвижен, электромагнитные колебания генераторов КА и аппаратуры пользователя (АП) строго синхронны, их частоты и начальные фазы одинаковы [20]. Тогда в АП фаза  $\phi_{кл}$  пришедших волн будет отставать от фазы  $\phi_{АП}$  местных колебаний на величину, пропорциональную времени  $t$  пробега волной расстояния  $R$  от спутника до наземной станции, где  $t = R/c$ . Разность фаз будет
- $D\phi = \langle p_{ш} - \phi_{ш} \rangle = \omega t = 2\pi f / c = 2\pi K / \lambda$ , (119)
- $R = D\phi \lambda / 2\pi = (N + \Phi)\lambda$ . (120)
- В формулах  $c$ ,  $f$  и  $X$  соответственно скорость электромагнитных колебаний в вакууме, частота и длина несущей волны. Отсюда
- $R = \kappa \phi X / 2\pi = (N + \Phi)\lambda$ , (121)
- где:  $\Phi$  - доля;
- $N$  - целое число волн  $X$  в расстоянии  $R$ .

- Важной особенностью является то, что измеряется только величина  $\Phi$ . Число  $N$  из измерений получить невозможно. Если длина волны 19 см, то фиксируется расстояние только в пределах этих 19 см. Учитывая высоту полета спутников, нетрудно подсчитать, что число  $N > 100\ 000\ 000$ . Сколько же точно - неизвестно. Задача не имеет однозначного решения. Нужны дополнительные усилия по нахождению чисел неоднозначности  $N$ , т.е. по разрешению неоднозначности фазовых измерений.
- В действительности задача еще сложнее. Колебания генераторов КА и АП несинхронны: их частоты отличаются от номинала, а начальные фазы неодинаковы. По этой причине в текущий момент суммарное искажение измеряемой разности фаз равно  $D\phi_{КА} + A\phi_{АП}$ . Кроме того, дальность до спутника  $R$  не остается постоянной. Пока волна идет от передатчика на спутнике до приемника на Земле, спутник движется. Соответственно расстояние  $R$  или растет, или убывает, изменяясь с некоторой скоростью  $v_R$ . В свою очередь скорость  $v_R$  также может или расти, или убывать.
- Вместе со спутником перемещается его передатчик. Вследствие перемещения передатчика возникает эффект Доплера. Если спутник движется навстречу приемнику, последний в единицу времени принимает больше волн по сравнению с неподвижным спутником. Это означает, что принимаемые волны стали короче, а частота колебаний - больше. С удалением спутника картина меняется на обратную - принимаемые волны удлиняются, а частота уменьшается. Частота принимаемого с дистанции сигнала отличается от частоты излучаемого сигнала на величину доплеровского сдвига частоты  $f\%$ .
- $f_D \sim -f v_R / c, \sim 2 \cdot 10^{-8} f v_R / c$  (1.22)
- где  $f_D$  - круговая доплеровская частота.

- Приемник осуществляет поиск пришедшего сигнала в диапазоне возможных доплеровских частот и выполняет подстройку под его частоту и фазу.
- Чтобы пояснить, как определяется пришедших в приемник волн фазовый сдвиг, пропорциональный пройденному ими пути, нужны такие понятия, как гетеродин, промежуточная частота и ряд других. Поэтому дальнейшие пояснения дадим, ограничиваясь геометрическим уровнем.

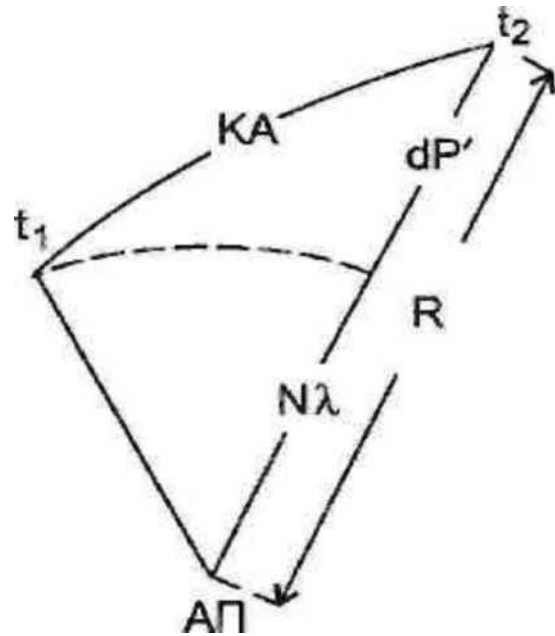


Рисунок 1.8 Определения  
геометрического расстояния  $R$  по  
фазовым измерениям

- Принципиально важно отметить одно обстоятельство. Как только приемник поймал сигнал спутника, он начинает отслеживать и измерять изменения разностей фаз, обусловленные движением спутника. После каждого изменения расстояния от спутника до приемника на длину несущей волны  $X$ , фаза этого сигнала меняется на один цикл. Поэтому измеряемая часть фазы несущей волны содержит не только долю, но и целое число циклов, фиксируемых с момента вхождения в синхронизм с принимаемым сигналом. Однако остается неизвестным целое число циклов  $N$ , которое было до установления связи. Неоднозначность фазовых измерений не устраняется.
- Дальности, определяемые по фазе несущей, для краткости будем называть фазовыми (сател phase range). В сущности, это псевдодальности. Однако обычно термин псевдодальность применяют к кодовым измерениям. Фазовая дальность  $P$  отличается от геометрического расстояния  $R$  между приемником и спутником на величины  $d$  и  $D$ , определяемые откликом шкал времени соответственно на спутнике и в приемнике от шкалы системного времени. Геометрическое расстояние  $R$  складывается из неизвестной постоянной части  $NX$  и измеряемой части  $dP$ , исправленной на величины  $d$  и  $D$  (на рисунке 1.8 исправленное значение  $dP$  обозначено как  $dP'$ ). Поэтому имеем:
  - $P = R + d + D = NX + dP$ , (1.23)
  - 
  - при этом  $dp = dp' + d + D$
  - $dp' = R - NX$
  - (124)
  - (125)
  - 
  -



# Определения фазовых дальностей на комбинированных волнах.

- Использование обеих несущих волн L1 и L2 предоставляет дополнительные возможности в разрешении неоднозначности фазовых измерений и устранении влияний внешних факторов. Для каждой из этих волн можно записать;
- $dp = R - N A + S$  (1.26)
- $dp = R - N_2 L_2 + s_2$  (1.27)
- где  $s_1$  и  $s_2$  учитывают всевозможные искажения дальностей R. Построив линейную комбинацию  $odp / L + Pdp / L$ , получим:
- $dp = R - N A + s$ , (1.28)
- где комбинированные “измеренная” часть дальности, длина волны и неизвестное их число соответственно равны
- $dp = (odp / L + Pdp / L_2) L$ ; (1.29)
- 
- 
- (1.30)
- (1.31)
- $L = C(O^f L_1 + P^f L_2)$ ;  $N = (O N_1 + P N_2)$ .
-

- В таблице 1.3 указаны  $a$  и  $b$  для наиболее важных комбинаций волн.

- Таблица 1.3 Комбинированные длины волн в фазовых измерениях

- Волна

- Частота

- $a$

- $b$

- $X$ , см

- $X_i$

- $L_2$

- 1

- 1

- 19,0

- $X_2$

- $L_1$

- 0

- 1

- 24,4

- $x_{раз}$

- Разностная

- 1

- -1

- 86,2

- $x_{сум}$

- Суммарная

- 1

- 1

- 10,7

- $x_{ион}$

- Ионосферно-свободная

- 9

- -7

- 5,4

- 

- Комбинированная длина волны  $X_{ион}$  - ионосферно-свободная (ionosphere-free). Волна  $X_{раз}$  сравнительно большой длины (wide lane - широкая полоса), образуется разностью частот  $L_1$  и  $L_2$  и иногда способствует разрешению неоднозначности. Волна  $X_{сум}$  (narrow-lane - узкая полоса) составляется суммой частот  $L_1$  и  $L_2$ . Расплатой за получаемые выгоды является то, что в комбинированных волнах, за исключением  $X_{сум}$ , возрастают шумы в приемниках.

- Новые возможности построения комбинированных волн и разрешения неоднозначности возникнут после введения частоты  $L_5$ . Появятся дополнительные комбинации  $L_1-L_5$  и  $L_2-L_5$ . Так волна, образованная из разности частот  $L_2$  и  $L_5$ , будет иметь длину 5,861 м, что должно существенно обогатить задачу разрешения неоднозначности фазовых измерений.

# Разрешение неоднозначности фазовых измерений

- . Это одна из наиболее сложных задач. Наметим лишь в общих чертах пути решения этой проблемы.
- Один из способов - совместная обработка фазовых и кодовых измерений. Для фазовых дальностей и кодовых псевдодальностей, с учетом их погрешностей  $\epsilon$  и  $\delta$ , можно записать:
- $dP = R - N\lambda + \epsilon$ , (1.32)
- $P = R + \delta$ . (1.33)
- Образовав их разность, получаем:
- $N = (P - dP - \delta + \epsilon) / \lambda$ . (1.34)
- Результат вычисления округляется до целого. Погрешность округления должна быть  $< 0,5$ . Следовательно, погрешность в разности длин должна быть менее полуволны  $\lambda$ . Если для этого использовать разносные волны длиной
- 862 или 5,861 м, то погрешность в кодовых измерениях должна быть соответственно  $< 0,43$  и  $< 2,93$  м.
- Другой распространенный способ - использование избыточных фазовых измерений. Все измерения обрабатываются по методу наименьших квадратов, а в число определяемых неизвестных параметров включается и числа неоднозначности  $N$ . Причем обработка ведется на разных комбинированных волнах.
- В случаях, когда позиционирование ведется в движении, вначале каким-нибудь способом, например, по измерениям на пунктах с известными координатами, определяются числа неоднозначности  $N$ . Затем, продолжая измерения по тем же спутникам, непрерывно фиксируют приращения чисел  $N$ , обусловленные изменениями дальностей вследствие движений АП и КА.
- Важное значение имеет способ разрешения неоднозначности, основанный на переборе вариантов решений. Для этого, например, по кодовым измерениям определяются приближенные координаты точки местонахождения приемника. От этой точки в направлениях трех координатных осей откладываются значения предельных погрешностей. В пространстве образуется куб. Куб делится на более мелкие кубики. Возможные решения лежат в вершинах этих кубиков. Перебором вариантов в этом пространстве находят наиболее подходящие числа неоднозначности  $N$ . Если точное решение лежит в кубе
- 39
- 10x10x10 м, то, проверяя его через каждый 1 см, получим 1001 « 10 вариантов. Поэтому переборы ведутся по определенной стратегии с тем, чтобы их число свести к минимуму.

- Разработаны специальные функции, которые позволяют упростить и ускорить обработку упомянутых переборов. Фазовая дальность, выраженная в фазовых циклах, равна:
- $p = (R - NA + s)/L$ . (1.35)
- Образует разность:
- $o = p - R / L = -N + s / L$  (1.36)
- Используя комплексные переменные ( $i^2 = -1$ ), получаем:  $\cos 2\theta + i \sin 2\theta = e^{i2\theta} = e^{i2s/L} * 1$  (1.37)
- Результат следует из того факта, что целое число циклов  $2nN$  никак не отражается на синусах и косинусах, а погрешности  $s$  полагаются малыми. Для измерений, выполненных по  $n$  спутникам и повторенных в  $m$  эпохах, можно записать:
- 
- 
- $Ss^i$
- $2n(p - R / L)$
- $< nm$  (138)
- 
- 
- $n$
- $m$  При переборах ячеек куба для каждого случая вычисляются упомянутые суммы модулей. Правильным будет то решение, для которого сумма максимальна и наиболее близка к числу  $nm$ .
- На основе ускоренных решений разработан и получил широкое распространение практически очень важный так называемый способ разрешения неоднозначности “на лету” (On The Fly - OTF).