

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ЗАМИРАНИЕМ

Инж. В. А. Котельников

Научно-технический сборник Электротехнического института связи
в Ленинграде. Вып. 11, Связьтехиздат, 1936, с. 15–26

QUANTITATIVE ESTIMATION OF VARIOUS ANTI-FADING PROCEEDINGS

Содержание

Методами теории вероятностей разобрана эффективность методов для борьбы с замиранием: а) увеличения отношения силы сигнала к силе помехи, б) применения двоянного и строенного приема и в) применения модуляции при телеграфировании.

Summary.

On the base of the theory of probabilities, the author gives a comparative analysis of the effectiveness of several anti-fading methods: a) increase of the ratio of the strength of signals to the strength of atmospherics; b) system of double and triple reception and c) use of modulation in wireless telegraphy.

1. Введение

Напряжение, поступающее с антенны на вход приемника при приеме коротковолновых радиостанций, как известно, испытывает сильные колебания. Если поступающее на приемник напряжение больше напряжения чувствительности приемника U_0 , то приемник, благодаря наличию в нем ограничителя или регулировки громкости, будет работать нормально. В моменты же времени, когда подаваемое напряжение меньше U_0 , прием будет отсутствовать. Тут под чувствительностью приемника U_0 подразумевается напряжение на входе приемника, достаточное для его нормальной работы.

В современных коротковолновых приемниках имеется запас усиления, так что напряжение их чувствительности U_0 приходится увеличивать по сравнению с номинальным до тех пор, пока не перестанут мешать приему атмосферные помехи или шумы приемника. Таким образом величина чувствительности у приемников с достаточно большим максимальным усилением определяется лишь уровнем внешних и внутренних помех.

Явление колебания силы приема называется замиранием. Оно вызывает перерывы разговора при радиотелефоне и пропадания сигналов, т. е. ошибки в депешах при радиотелеграфировании.

Замирание является основным недостатком коротковолновой радиосвязи.

В целях борьбы с пропадающими сигналами из-за замираний в настоящее время применяются следующие три основных метода:

1. Увеличение отношения силы сигнала к силе помех на приеме путем увеличения мощности передатчика и усложнения приемных и передающих антенн.

2. Применение сдвоенного и строенного приема.

3. Применение модулированных колебаний при радиотелеграфировании.

В данной статье разбирается количественно эффективность этих методов и приводится их сравнение, что позволяет выбрать наиболее эффективный метод для заданных условий и подойти к количественному расчету коротковолновых линий радиосвязи.

Для проведения такой оценки необходимо ввести понятия, которые характеризовали бы количественно качество приема при замираниях.

2. Основные понятия

Назовем отрезки времени, в течение которых поступающее на приемник напряжение меньше U_0 (порог чувствительности приемника), пропадающими.

Очевидно прием будет тем хуже, чем чаще будут случаться пропадания и чем продолжительней они будут. Обозначим продолжительность отдельного пропадания через τ_k . Таким образом, качество приема можно охарактеризовать отношением суммарной продолжительности ($\sum \tau_k$) пропаданий за какой-то достаточно большой отрезок времени (T) к этому промежутку времени, т. е. величиной:

$$S = \frac{\sum \tau_k}{T}. \quad (1)$$

Величина S является также вероятностью того, что в данный момент поступающее на вход приемника напряжение будет меньше U_0 , т. е., что в данный момент случится пропадание. Поэтому величину S будем называть *вероятностью пропадания*.

Иногда продолжительность пропадания большой роли не играет, а играет роль лишь их число. Так, например, при радиотелеграфировании мы имеем такой случай тогда, когда каждая депеша, пришедшая с ошибкой, повторяется, независимо от того, сколько в ней искаженных букв.

Для характеристики замирания с этой стороны введем понятие: число пропаданий в единицу времени n :

$$n = \frac{N}{T}, \quad (2)$$

где N — число пропаданий за достаточно большой период времени T .

Кроме этих величин полезно бывает знать еще среднюю продолжительность одного пропадания:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\sum \tau_k}{N} = \frac{\sum \tau_k}{T} \times \frac{T}{N} = \frac{S}{n}. \quad (3)$$

Введя эти понятия как меру качества приема, можно количественно сравнивать различные методы борьбы с замиранием, а также получить данные, необходимые для расчета коротковолновых линий радиосвязи.

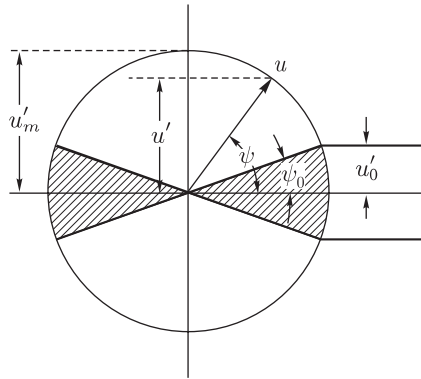
3. Зависимость качества приема от его силы и порога чувствительности приемника

В этом разделе будет выяснена эффективность первого из перечисленных выше методов борьбы с замиранием.

Причинами наиболее часто встречающихся замираний можно считать, во-первых, изменение плоскости поляризации волны и, во-вторых (в случае прихода нескольких лучей), интерференцию между отдельными лучами.

Начнем со случая, когда приходит один луч.

а) Приходит один луч



Фиг. 1

В этом случае замирание очевидно может произойти за счет вращения плоскости поляризации, так как обычная антенна принимает лишь составляющую поля, совпадающую с направлением осей диполей, а при вращении плоскости поляризации волны величина этой составляющей U' будет меняться с изменением угла наклона плоскости поляризации ψ , как показано на фиг. 1.

На этом рисунке U'_0 — составляющая напряженности поля по диполю, которая дает на входе приемника напряжение U_0 , достаточное для нормального приема.

В том случае, когда ψ заключается в пределах:

$$-\psi_0 < \psi < +\psi_0$$

или

$$180^\circ - \psi_0 < \psi < 180^\circ + \psi_0, \quad (4)$$

т. е. лежит в заштрихованных углах, очевидно будет иметь место про падание. Здесь

$$\sin \psi_0 = \frac{U'_0}{U'_m} = \frac{U_0}{U_m}, \quad (5)$$

где U_m — максимальное значение напряжения на входе приемника, соответствующее $\psi = \pm 90^\circ$.

В том случае, если приход луча с любым углом равновероятен, вероятность про падания будет равна отношению суммы дуг заштрихованных углов, т. е. $4\psi_0$ к длине окружности 2π . Таким образом

$$S = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{U_0}{U_m}. \quad (6)$$

В случае, если отношение U_0/U_m невелико, как обычно и бывает при приеме коротких волн, получим:

$$S = \frac{2}{\pi} \frac{U_0}{U_m} = 0,64 \frac{U_0}{U_m}. \quad (7)$$

В случае же, если вероятность прохождения луча с данным углом ψ зависит от этого угла или, если составляющая в плоскости диполя меняется не по кругу, как на фиг. 1, а скажем по эллипсу, как это может быть при отражении луча от земли или в случае прихода луча перпендикулярно к диполю, то в формуле (7) для малых ψ вместо $2/\pi$ будет какой-то другой постоянный коэффициент, который можно определить экспериментально. В общем случае при проходе одного луча получим:

$$S = B \frac{U_0}{U_m}. \quad (7a)$$

Число глубоких замираний в единицу времени в случае прихода одного луча не должно меняться от отношения U_0/U_m , так как очевидно, что почти все такие про падания будут происходить при переходе угла ψ через 0 или 180° , а в этом случае про падание произойдет, как бы мало ни было отношение U_0/U_m . Эксперимент показывает, что действительно n , вообще говоря, не зависит от U_0/U_m , и лишь при малых значениях величины U_0/U_m n начинает приближаться к нулю. Это можно объяснить тем, что, помимо основного луча с большой амплитудой, на практике имеются почти всегда еще добавочные лучи с малыми амплитудами. Поэтому при малых U_0/U_m мы имеем случай прихода нескольких лучей, при котором (см. ниже) n уменьшается пропорционально U_0/U_m .

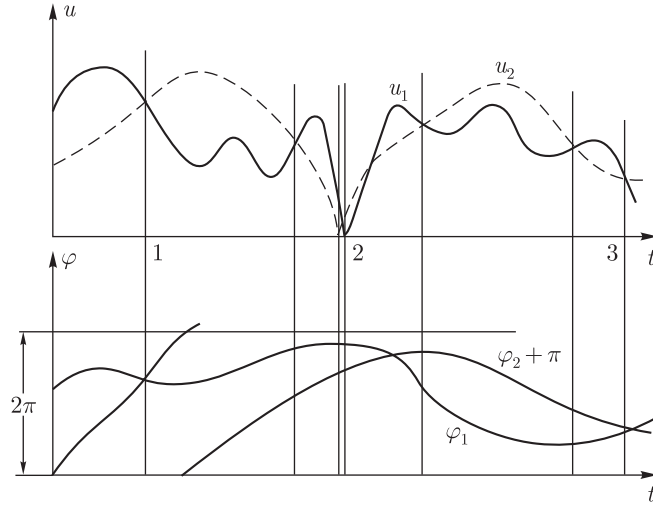
Среднюю пропорциональность про падания можно вычислить по формуле (3)

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{S}{n} = \frac{B}{n} \times \frac{U_0}{U_m}. \quad (76)$$

Как видим, она будет уменьшаться пропорционально отношению U_0/U_m .

б) Приходят два луча с изменяющимися плоскостями поляризации

Пусть на вход приемника поступает напряжение от двух лучей, амплитуды и фазы которых изменяются по времени, как это изображено на фиг. 2.



Фиг. 2

Результирующее напряжение на входе приемника определится следующей величиной:

$$\begin{aligned}
 U^2 &= U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \\
 &= (U_1 - U_2)^2 + 4U_1U_2 \sin^2\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \pi}{2}\right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Если рассматривать лишь пропадания при глубоких пропаданиях или, что то же, лишь малые отношения U_0/U_m , что и интересно для практики, то такие пропадания будут получаться в двух случаях; 1) когда амплитуды обоих лучей почти равны друг другу, а фазы их противоположны (точки 1 и 3) (интерференционное замирание); 2) когда амплитуды обоих лучей одновременно малы (точка 2).

Разберем два этих случая отдельно. Начнем с первого.

Так как для первого случая пропадания необходимо, чтобы $U_1 \approx U_2$, то можно считать, что этот вид пропадания будет происходить почти всегда около точки пересечения кривых U_1 и U_2 . Таким образом, для небольшого отрезка времени вблизи пропадания можно считать

$$U_1 - U_2 = at. \quad (9)$$

Тут за начало отсчета времени берем точку пересечений кривых U_1 и U_2 .

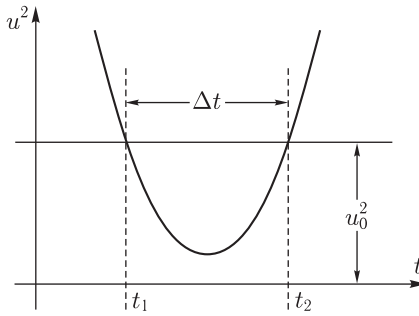
Кроме того, для этого же отрезка времени можно положить

$$2\sqrt{U_1 U_2} \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \pi}{2}\right) = b(t - t_0). \quad (10)$$

Подставляя эти выражения в формулу (8), получим:

$$U^2 = a^2 t^2 + b^2 (t - t_0)^2, \quad (13)$$

т. е. U^2 будет в этом участке изменяться по параболе (фиг. 3).



Фиг. 3

Определяем из уравнения (13) моменты начала и конца пропадания t_1 и t_2 , приравнявая U^2 величине U_0^2 . Затем вычислим продолжительность пропадания. Получаем:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{a^2 + b^2} \sqrt{(a^2 + b^2)U_0^2 - a^2 b^2 t_0^2}. \quad (14)$$

Отсюда видно, что Δt является функций a, b, t_0 .

В том случае, если

$$t_0^2 > \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} U_0^2,$$

пропадания не будет совсем.

Из теории вероятностей известно, что, если какая-то величина есть функция $f(a, b, t_0)$ некоторых величин a, b и t_0 , которые могут меняться от случая к случаю и если:

$$\left. \begin{aligned} &\text{вероятность того, что } a \text{ лежит между } a_1 \text{ и } a_1 + da = p_a da, \\ &\text{вероятность того, что } b \text{ лежит между } b_1 \text{ и } b_1 + db = p_b db, \\ &\text{вероятность того, что } t_0 \text{ лежит между } t_{01} \text{ и } t_{01} + dt_0 = p_{t_0} dt_0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

то среднее значение величины Δt будет:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \int_{-\infty}^{+\infty} da \int_{-\infty}^{+\infty} db \int_{-\infty}^{+\infty} dt_0 f(a, b, t_0) p_a p_b p_{t_0}. \quad (16)$$

Для нашей функции получим:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \int_{-\infty}^{+\infty} da \int_{-\infty}^{+\infty} db \int_{-\frac{\sqrt{a_1^2+b_1^2}}{a_1 b_1}}^{\frac{\sqrt{a_1^2+b_1^2}}{a_1 b_1}} U_0 \frac{2}{a_1^2+b_1^2} \sqrt{(a_1^2+b_1^2)U_0^2 - a_1^2 b_1^2 t_{01}^2} p_a p_b p_{t_0} dt_0. \quad (17)$$

Пределы интегрирования в последнем интеграле выбраны так потому, что пропадание может быть лишь в том случае, если t_{01} лежит в этих пределах.

Введя новую переменную

$$x = \frac{t_{01} a_1 b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2} U_0}, \quad (18)$$

получим:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \int_{-\infty}^{+\infty} da \int_{-\infty}^{+\infty} db \int_{-1}^{+1} \frac{U_0^2}{a_1 b_1} \sqrt{1-x^2} p_a p_b p_{t_0} dx. \quad (19)$$

U_0 как постоянную величину можно вынести за интегралы и тогда получим:

$$\Delta t_{\text{cp}} = U_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} da \int_{-\infty}^{+\infty} db \int_{-1}^{+1} \frac{p_a p_b p_{t_0}}{a_1 b_1} \sqrt{1-x^2} dx. \quad (20)$$

Величина интегралов не зависит от U_0 , если p_a , p_b , p_{t_0} , a_1 и b_1 не зависят от t_0 . Действительно, в противном случае, при замене переменной t_0 на x , в эти величины войдет U_0 . Высказанное здесь допущение справедливо, так как для двух лучей, идущих независимыми путями, можно считать, что кривые разности напряжений и разности фаз друг от друга независимы, и значит все значения t_0 равновероятны.

Таким образом имеем:

$$\Delta t_{\text{cp}} = D U_0^2, \quad (21)$$

где D зависит от мощности передатчика, условий распространений и антенн.

Полученное Δt_{cp} есть средняя продолжительность пропадания около одного из пересечений кривых U_1 и U_2 , с учетом того, что иногда около данного пересечения пропадания может и не произойти (t_0^2 очень велико). Если мы эту величину помножим на число таких точек пересечения в единицу времени n_v , то получим среднюю суммарную продолжительность пропадания в единицу времени, т.е. вероятность пропадания

$$S = \Delta t_{\text{cp}} n_v = n_v D U_0^2. \quad (22)$$

Данная формула для практики не совсем удобна, потому что зависит не только от условий распространения, но и от мощности передатчика и антенн.

Представим формулу (22) в следующем виде:

$$S = A_1 \left(\frac{U_0}{U_m} \right)^2 \quad (23)$$

или

$$S = A'_1 \left(\frac{U_0}{U_{\text{ср}}} \right)^2, \quad (24)$$

где U_m и $U_{\text{ср}}$ соответствуют максимальному и среднему значениям напряжений, поступающих на вход приемника.

Величины A_1 и A'_1 не зависят от мощности передатчика и свойств антенн, а лишь от условий распространения, т. е. соотношений между амплитудами лучей¹⁾.

Формулой (23) пользоваться на практике удобней, так как ряд наблюдений показывает, что обычно U_m довольно устойчиво и его легче измерять.

Подсчитаем теперь вероятность пропадания для второго случая, когда амплитуды обоих лучей одновременно малы.

Так как этот случай нам будет встречаться почти всегда лишь при переходе угла поляризации φ для обоих лучей через 0 или 180° (см. фиг. 2), то напряжение от лучей будет в этом случае почти всегда менять свою фазу на обратную, и можно для небольшого отрезка времени считать:

$$U_1 = at; \quad U_2 = b(t - t_0). \quad (25)$$

Подставляя эти величины в формулу (8) и считая, что во время пропадания $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ можно считать постоянным²⁾ и равным C , получаем:

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2C = (a^2 + b^2 + 2abc)t^2 - 2(b^2 + abc)t_0t + b^2t_0^2. \quad (26)$$

Тут получается тоже квадратичная зависимость U от t и t_0 , как и в формуле (13).

Определяя по формуле (26) продолжительность пропадания, мы получим формулу, отличающуюся от формулы (14) только постоянными коэффициентами.

Проводя такое же, как и раньше, интегрирование для получения $\Delta t_{\text{ср}}$ и переходя затем к вероятности пропадания, мы получим

¹⁾ Коэффициенты A_1 и A'_1 могут зависеть и от направленности антенны, если она настолько остра, что некоторые лучи не принимаются.

²⁾ Может, конечно, быть и такой случай, что в момент пропадания обоих лучей $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ меняет также знак, но такой случай встретится весьма редко, и мы его отбрасываем.

результат совершенно аналогичный формулам (23) и (24):

$$S = A_2 \left(\frac{U_0}{U_m} \right)^2 \quad (27)$$

или

$$S = A'_2 \left(\frac{U_0}{U_{cp}} \right)^2, \quad (28)$$

где коэффициенты A_2 и A'_2 зависят от условий распространения. Общая вероятность пропадаания равна сумме этих вероятностей. Складывая формулы (23) и (27), (24) и (28) и вынося $\left(\frac{U_0}{U_m} \right)^2$ за скобки, получим:

$$S = A \left(\frac{U_0}{U_m} \right)^2, \quad (29)$$

$$S = A' \left(\frac{U_0}{U_{cp}} \right)^2. \quad (30)$$

Величины A и A' могут быть найдены экспериментально. В случае интерференционного замирания число пропаданий в единицу времени может быть вычислено следующим образом.

Как видно из формулы (14), пропадание будет иметь место, если:

$$t_0 < \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} U_0^2, \quad (33)$$

т. е.

$$-\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} U_0 < t_0 < \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} U_0. \quad (34)$$

Вероятность того, что t_0 попадет в эти пределы, т. е. что при данном пересечении произойдет пропадание, будет:

$$2p_{t_0} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} U_0, \quad (35)$$

где p_{t_0} взято из выражения (15).

Выражение (35) дает, другими словами, число пропаданий, приходящихся на одно пересечение в среднем.

Таким образом, вероятное число пропаданий в единицу времени будет:

$$n = 2p_{t_0} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} U_0 n_U, \quad (36)$$

где n_U — число пересечений кривых U_1 и U_2 в единицу времени; величины a и b должны быть взяты средние.

Таким образом, n будет уменьшаться пропорционально U_0 .

Если мы хотим, чтобы коэффициент пропорциональности зависел не от мощности передатчика и антенн, а лишь от условий распростра-

нения, то можно записать так:

$$n = g_1 \frac{U_0}{U_m}. \quad (37)$$

Для случая второго вида пропадаания, в случае прихода двух лучей, мы получим аналогичный результат, так как все рассуждения для этого случая могут быть проведены аналогично, только началом должна быть формула (26), вместо формулы (13).

Складывая это число пропаданий с числом, получаемым из формулы (37), мы получим:

$$n = g \frac{U_0}{U_m}, \quad (38)$$

где g зависит лишь от условий распространения.

Отсюда легко вычислить и среднюю продолжительность пропаданий:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{S}{n} = \frac{A \left(\frac{U_0}{U_m} \right)^2}{g \frac{U_0}{U_m}} = \frac{A}{g} \frac{U_0}{U_m}. \quad (39)$$

Таким образом $\tau_{\text{ср}}$ так же, как и для случая одного луча, убывает пропорционально отношению $\frac{U_0}{U_m}$.

в) Приходит много лучей

Разделим все приходящие лучи на две группы и обозначим через U_1 суммарное напряжение от всех лучей первой группы и аналогично U_2 — от второй группы.

В этом случае так же, как и в предыдущем, могут быть два вида пропадаания.

Второй вид пропадаания в этом случае будет, при достаточно малых отношениях U_0/U_m , встречаться редко, так как в случае прихода в место приема двух и большего количества лучей в одной группе вероятность пропадаания уменьшается пропорционально квадрату отношения U_0/U_m , и значит случаи, когда обе группы лучей одновременно будут иметь малую амплитуду, встретятся редко. Поэтому пропадаания этого вида отбрасываем.

Рассмотрение первого вида пропадаания будет совершенно аналогично рассмотрению для случая двух лучей и поэтому приведет к тем же результатам. Тут только вместо каждого из двух лучей будет целая группа лучей, но это на ходе рассуждений и результате не отзовется. Мы получим для S ф-лы (29) и (30), где величины A и A' , вообще говоря, численно могут отличаться от прежних.

Величины A и A' будут опять зависеть лишь от условий распространения (числа лучей и соотношения их амплитуд).

Для числа пропаданий в единицу времени и их средней продолжительности, учитывая лишь интерференционные замирания согласно вышесказанному, мы получим опять ф-лы (38) и (39), так как все рассуждения останутся прежними.

4. Сдвоенный прием

Сдвоенный прием ведут на две настолько разнесенных антенны, чтобы пропадания на одной и на другой происходили независимо друг от друга; к каждой антенне присоединяется свой приемник, выходы которых, после выпрямления сигналов, соединяются вместе. Таким образом, пропадание при таком приеме будет получаться лишь тогда, когда оно имеет место сразу на обоих приемниках.

Вероятность того, что в данный момент произойдут два независимых друг от друга события, равняется произведению вероятностей этих событий. Таким образом, вероятность пропадания при сдвоенном приеме будет:

$$S = S' S'' , \quad (40)$$

где S' и S'' — вероятности пропадания на первом и на втором приемниках.

В случае, если оба приемника находятся в одинаковых условиях, то $S' = S'' = S_1$ и значит:

$$S = S_1^2 . \quad (41)$$

Подсчитываем теперь число пропаданий при сдвоенном приеме.

Возьмем какой-то большой отрезок времени T единиц. Пусть, для примера, на первом приемнике за это время случилось три пропадания в промежутки времени 2–3, 5–6, 8–9 (см. фиг. 4).

Продолжительность каждого из них обозначим через τ'_1 , τ'_2 и τ'_3 .

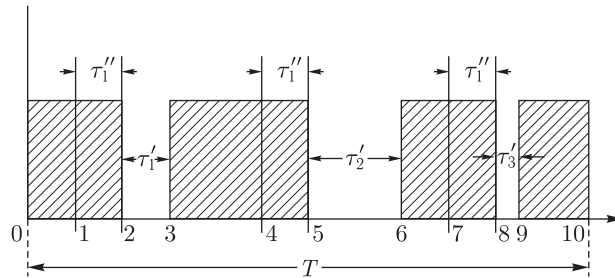
На втором пусть будет одно пропадание с продолжительностью τ''_1 . Спрашивается, какова вероятность, что эти пропадания совпадут, т. е. случится пропадание при сдвоенном приеме.

Очевидно это случится, если начало пропадания τ''_1 попадет в один из отрезков времени 1–3, 4–6 или 7–9 с продолжительностями $\tau''_1 + \tau'_1$, $\tau''_1 + \tau'_2$, $\tau''_1 + \tau'_3$ соответственно, как это видно из рисунка, но так как пропадание τ''_1 может начаться в любой момент отрезка времени T , то вероятность, что это начало попадет в упомянутые выше отрезки, т. е. вероятность того, что пропадания будут одновременны на обоих приемниках, будет отношением суммы продолжительностей этих отрезков ко всему отрезку T , т. е.:

$$p_1 = \frac{\tau''_1 + \tau'_1 + \tau''_1 + \tau'_2 + \tau''_1 + \tau'_3}{T} = \tau''_1 n' + S' ,$$

где n' — число пропаданий в единицу времени на первом приемнике (т. е. в нашем случае $3/T$), S' — вероятность пропадания на этом приемнике, а p_1 есть число общих для обоих приемников пропаданий за период времени T , приходящееся на одно пропадание второго приемника продолжительностью τ''_1 .

Если на втором приемнике произойдет за отрезок времени T еще одно пропадание с продолжительностью τ''_2 , то вероятность того, что



Фиг. 4

оно совпадет с одним из пропаданий на первом приемнике, может быть подсчитана аналогично. Она будет:

$$p_2 = \tau_2'' n' + S'.$$

Общее же вероятное количество пропаданий за отрезок времени T будет:

$$p_1 + p_2.$$

В случае многих пропаданий на втором приемнике ³⁾ получим для среднего количества пропаданий за отрезок времени T величину:

$$\sum_{k=1}^{n''T} p_k k = \sum_{k=1}^{n''T} \tau_k'' n' + \sum_{k=1}^{n''T} S' = n' \sum_{k=1}^{n''T} \tau_k + n'' T S',$$

а на единицу времени получим:

$$n = \frac{\sum_{k=1}^{n''T} p_k k}{T} = n' S'' + n'' S', \tag{42}$$

так как

$$\sum_{k=1}^{n''T} \tau_k = S''$$

— вероятность пропадания на втором приемнике.

Если $n' = n'' = n_1$ и $S' = S'' = S_1$, то

$$n = 2n_1 S_1. \tag{43}$$

Средняя продолжительность пропадания при сдвоенном приеме будет:

$$\tau_{cp} = \frac{S}{n} = \frac{S' S''}{n' S'' + n'' S'} = \frac{1}{\frac{n'}{S'} + \frac{n''}{S''}} = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{cp}'} + \frac{1}{\tau_{cp}''}} = \frac{\tau_{cp}' \tau_{cp}''}{\tau_{cp}' + \tau_{cp}''} \tag{44}$$

³⁾ В общем случае их число будет $n''T$, где n'' — число пропаданий в единицу времени на втором приемнике.

или лучше:

$$\frac{1}{\tau_{\text{ср}}} = \frac{1}{\tau'_{\text{ср}}} + \frac{1}{\tau''_{\text{ср}}}. \quad (45)$$

Если

$$\tau'_{\text{ср}} = \tau''_{\text{ср}},$$

то

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\tau'_{\text{ср}}}{2}. \quad (46)$$

5. Строенный прием

Строенный прием производится на три разнесенных друг от друга антенны так же, как сдвоенный на две. При таком приеме пропадание может получиться лишь при наличии одновременного пропадания на трех антеннах.

Вычисление вероятности пропадания и других величин можно произвести, предположив, что сдваиваем третий приемник с уже сдвоенным первым и вторым.

Соответственно этому получим:

$$S = (S' S'') S''' = S' S'' S''' \quad (47)$$

и, если условия приема одинаковы, то

$$S = S^3. \quad (48)$$

Число пропаданий в единицу времени будет:

$$n = (n' S'' + n'' S') S''' + n''' S' S'' = n' S'' S''' + S' n'' S''' + S' S'' n''' \quad (49)$$

при одинаковых условиях приема:

$$n = 3n_1 S_1^2. \quad (50)$$

Средняя продолжительность пропадания:

$$\frac{1}{\tau_{\text{ср}}} = \frac{1}{\tau'_{\text{ср}}} + \frac{1}{\tau''_{\text{ср}}} + \frac{1}{\tau'''_{\text{ср}}} \quad (51)$$

и при одинаковых условиях приема:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\tau'_{\text{ср}}}{3}. \quad (52)$$

6. Прием модулированных сигналов

В целях уменьшения пропаданий иногда применяют передачу телеграфных сигналов, модулированных низкой частотой. При этом способе передачи во время манипуляции исчезают и появляются несущая и боковые частоты сразу.

Все эти три частоты обычно после преобразования в детекторе с гетеродином попадают на выпрямитель, где и выпрямляются.

Если при приеме немодулированных колебаний прием прекращается, когда напряжение на входе падает ниже U_0 , то при приеме модулированных колебаний прием может прекратиться, если напряжение у всех частот одновременно упадет ниже U_0 .

Так как на разных частотах, в случае достаточного расстояния между ними по частоте, замирания бывают одновременно, как и при разнесенных антеннах, то вероятность пропаданий и их количество будут уменьшаться при приеме модулированных колебаний. С другой стороны, так как при модулированной передаче амплитуды несущей, и тем более боковых, будут меньше, чем амплитуда при немодулированной работе, то от этого условия приема ухудшатся.

Поэтому для выяснения количественного преимущества модулированной передачи необходимо заняться расчетом.

Будем считать, что пропадание при модулированной передаче наступает тогда, когда ни одно из принимаемых напряжений не превосходит порога чувствительности приемника U_0 .

При таком рассмотрении мы будем получать для модулированной передачи более плохие цифры, чем они будут на самом деле, так как возможен случай, когда ни одно из поступающих на вход приемника напряжений не будет превосходить U_0 , а пропадания все-таки не будет, так как суммарное напряжение будет превосходить U_0 .

Более точное рассмотрение вопроса создает большие трудности при подсчете числа пропаданий и их средней продолжительности.

Если предположить, что частота модуляции настолько высока, что пропадания происходят на несущей и на боковых независимо друг от друга, то при сделанном выше предположении можно рассчитывать пропадание при модулированной передаче, как при строенном приеме, учтя только изменение амплитуды на каждой из частот.

Если обозначим через S , $\tau_{\text{ср}}$ и n вероятность, среднюю продолжительность и число пропаданий в единицу времени при немодулированной работе, то для несущей мы получим ⁴⁾:

$$S' = 4S, \quad \tau'_{\text{ср}} = 2\tau_{\text{ср}}, \quad n' = 2n,$$

так как амплитуда несущей будет вдвое меньше амплитуды при работе немодулированными колебаниями.

Соответственно для боковых получим:

$$S'' = S''' = 16S, \quad \tau''_{\text{ср}} = \tau'''_{\text{ср}} = 4\tau_{\text{ср}}, \quad n'' = n''' = 4n.$$

⁴⁾ Рассматриваем случай прихода нескольких лучей, так как при приходе одного с вращающейся плоскостью поляризации очевидно затухание на всех частотах будет происходить одновременно. Также считаем частоту модуляции настолько большой, что пропадание на несущей и боковой независимы.

Пользуясь ф-лами (47) и (51), мы получим для приема модулированных колебаний выражение:

$$1) S_M = S' S'' S''' = 1024 S^3, \quad (53)^5$$

$$2) \frac{1}{\tau_{ср м}} = \frac{1}{\tau_{ср}} + \frac{1}{\tau_{ср}''} + \frac{1}{\tau_{ср}'''} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \frac{1}{\tau_{ср}} = \frac{1}{\tau_{ср}}, \quad (55)$$

$$3) n_M = \frac{S_M}{\tau_{ср м}} = \frac{1024 S^3}{\tau_{ср}} = 1024 n S^2. \quad (56)$$

Как видно, средняя продолжительность пропадания как при модулированных, так и при немодулированных колебаниях не изменяется.

Что же касается вероятностей пропадания и их числа, то, как видно из ф-л (54) и (56), при $S > \sqrt{1024} = 32$ немодулированные колебания дают лучший результат; при $S < 32$ лучший результат, наоборот, дают модулированные колебания.

7. Итоги

Итоги можно свести в таблицу:

	S	n	
1) Эффект изменения отношения $\frac{\text{сила сигнала}}{\text{сила помех}}$ Много лучей	$S = A \left(\frac{U_0}{U_m}\right)^2$	$n = g \frac{U_0}{U_m}$	$\tau_{ср} = \frac{A}{g} \frac{U_0}{U_m}$
Один луч	$S = B \frac{U_0}{U_m}$	$n = \text{const}$	$\tau_{ср} = \frac{B}{n} \frac{U_0}{U_m}$
2) Эффект сдваивания	$\left\{ \begin{array}{l} S = S' S'' \\ S = S_1^2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} n = n' S'' + n'' S'' \\ n = 2n_1 S_1 \end{array} \right.$	$\frac{1}{\tau_{ср}} = \frac{1}{\tau_{ср}'} + \frac{1}{\tau_{ср}''}$ $\tau_{ср} = \frac{\tau_{ср1}}{2}$
3) Эффект страивания	$\left\{ \begin{array}{l} S = S' S'' S''' \\ S = S_1^3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} n = n' S'' S''' + \\ + S' n'' S''' + S' S'' n''' \\ n = 3n_1 S_1^2 \end{array} \right.$	$\frac{1}{\tau_{ср}} = \frac{1}{\tau_{ср}'} +$ $+ \frac{1}{\tau_{ср}''} + \frac{1}{\tau_{ср}'''}$ $\tau_{ср} = \frac{\tau_{ср1}}{3}$
4) Прием модулированной телеграфной работы. При ординарном приеме.	$S_M = 1024 S^3$	$n_M = 1024 n S^2$	$\tau_{ср м} = \tau_{ср}$

⁵⁾ Точное рассмотрение вопроса для квадратичного детектирования дает:
 $S_M = 170 S^3$.

Здесь A и g — величины, зависящие от условий приема, определяются экспериментально.

Величина B должна равняться, примерно, $2/\pi$.

S' , S'' , S''' , n' , n'' , n''' , $\tau'_{\text{ср}}$, $\tau''_{\text{ср}}$ и $\tau'''_{\text{ср}}$ — вероятность пропаданий, их число в единицу времени и средняя продолжительность для сдваиваемых и страиваемых приемников.

S_1 , n_1 и $\tau_{\text{ср}}$ — то же в случае, если условия приема на сдваиваемых и страиваемых приемниках одинаковы.

S_m , n_m и $\tau_{\text{ср } m}$ — вероятность пропаданий, их число в единицу времени и средняя продолжительность при приеме модулированных колебаний.

В случае сдвоенного и строенного приема модулированных колебаний эти величины должны быть еще подставлены в соответствующие формулы.