

ПРОБЛЕМЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Проф. В. А. Котельников

Министерство промышленности средства связи
Радиотехнический сборник
Гос. энергетич. изд-во, М., Л.: 1947, с. 5–12

Определяется понятие импульсных и флюктуационных помех. Рассматривается возможность увеличения помехоустойчивости путем изменения метода приема. Указывается предел, который в данном случае при флюктуационной помехе перейти нельзя, но можно достигнуть. Показывается, насколько может быть изменен этот предел при использовании новых способов передачи.

1. В данной статье рассматривается возможность повышения помехоустойчивости радиосвязи путем усовершенствования радиоприемников и применения новых методов модуляции и манипуляции.

2. В начале рассмотрим, насколько и каким образом можно увеличить помехоустойчивость путем усовершенствования радиоприемников при используемых в настоящее время методах модуляции и манипуляции. Ответ на этот вопрос будет различен в зависимости от вида помех.

В статье рассматриваются два вида помех:

а) Одиночно импульсные помехи, когда в приемнике помеха создает отдельные импульсы, настолько редкие, что они практически не накладываются друг на друга.

б) Флюктуационные или гладкие помехи. Под действием этих помех в приемнике также создаются импульсы, но в данном случае будем считать, что они возникают независимо друг от друга в таком большом количестве, что многократно накладываются друг на друга и к ним становятся применимы законы больших чисел теории вероятностей.

Можно рассматривать еще и третий вид помех — промежуточный между двумя уже упомянутыми, но его по причинам, изложенным в дальнейшем, исследовать не будем.

3. Начнем рассмотрение с флюктуационных помех, так как для них вопрос более разработан.

Можно ли при этом виде помех, только усовершенствовав радиоприемник, беспредельно увеличивать помехоустойчивость, или существует некоторый предел — некоторая максимальная помехоустойчивость, перейти которую при данной системе модуляции и помехе нельзя?

Исследование этого вопроса показывает, что справедливо второе, что при флюктуационной помехе существует для данного вида модуляции некоторая предельно-максимальная или, как будем ее называть, потенциальная помехоустойчивость, которая в идеале достижима, но которую превзойти нельзя.

Справедливость этого положения вытекает из следующего. Как можно показать [Л. 1], колебание флюктуационной помехи может с той или другой вероятностью принимать любую форму и, таким образом, может любой сигнал, прикладываясь к нему, превратить в любое колебание, а значит и в такое, при котором данный приемник воспроизведет неверное сообщение (т. е. неверный звук или неверный телеграфный знак), как бы этот приемник совершенен ни был.

Работа каждого приемника может быть математически охарактеризована зависимостью между воздействующим на него колебанием и воспроизводимым им при этом сообщением (т. е. звуком, телеграфным знаком и т. п.). Для каждой такой зависимости можно подсчитать среднее значение искажений, вызываемых флюктуационной помехой. Можно также найти такую зависимость, при которой это среднее значение будет минимально.

Эта последняя зависимость будет, очевидно, характеризовать идеальный приемник, который обеспечивает максимально возможную, т. е. потенциальную, помехоустойчивость.

4. Для иллюстрации сказанного рассмотрим простейший случай, когда передаваемые сигналы телеграфного типа состоят из последовательно посылаемых элементарных сигналов, каждый из которых может иметь равновероятно два значения: $A(t)$ или $B(t)$. В частном случае обычной амплитудной манипуляции $A(t)$ будет отрезком синусоидального колебания высокой частоты, а $B(t) = 0$. В случае частотной манипуляции $A(t)$ и $B(t)$ будут одинаковыми по длительности и амплитуде синусоидальными колебаниями, имеющими разные частоты.

Рассматривая этот случай в общем виде, когда $A(t)$ и $B(t)$ могут быть любыми представляемыми интегралом Фурье функциями, приходим к выводу [Л. 1], что приемник будет давать наименьшее число искажений в среднем, если между воздействующим на него колебанием $X(t)$ и воспроизводимыми при этом сообщениями будет существовать такая зависимость.

Приемник будет воспроизводить сообщение, соответствующее сигналу $A(t)$, когда

$$\int_{-T/2}^{+T/2} [X(t) - A(t)]^2 dt < \int_{-T/2}^{+T/2} [X(t) - B(t)]^2 dt, \quad (1)$$

или сообщение, соответствующее сигналу $B(t)$ в противном случае.

В выражении (1) участок интегрирования $-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}$ должен быть настолько большим, чтобы полностью охватить всю длительность сигналов $A(t)$ и $B(t)$.

Вероятность неправильного воспроизведения сигнала при таком идеальном приемнике, как показывает расчет, будет равна:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\alpha} e^{-z^2/2} dz, \quad (2)$$

где

$$\alpha^2 = \frac{1}{2\sigma^2} \int_{-T/2}^{+T/2} [A(t) - B(t)]^2 dt, \quad (3)$$

σ — средняя удельная интенсивность напряжения колебания помехи в эффективных вольтах на корень квадратный из полосы в герцах; $A(t)$ и $B(t)$ — напряжение колебаний сигналов в вольтах, действующее в той точке приемника, где интенсивность помехи равна σ . В таблице для ориентировки дана зависимость p от α , соответствующая формуле (2).

α	0	0,5	1	2	3	4	5
p	0,5	0,31	0,16	0,033	0,0014	0,000032	0,00000003

Вероятность p будет характеризовать максимальную возможную, т. е. потенциальную, помехоустойчивость при данных сигналах и помехе.

5. Для других случаев радиопередачи как телеграфного, так и телефонного характера при флюктуационной помехе также существует максимально возможная, т. е. потенциальная, помехоустойчивость.

Усовершенствование приемников может повысить помехоустойчивость, если мы еще не достигли ее потенциального значения.

В случае, если приемник уже обеспечивает потенциальную помехоустойчивость, его дальнейшее усовершенствование не сможет увеличить помехоустойчивость радиосвязи до тех пор, пока не будет изменен метод модуляции или манипуляции.

6. Проведенный анализ [Л. 1] многих частных случаев модуляции показал, что, применяя известные и уже используемые в настоящее время методы радиоприема, можно почти для всех рассмотренных случаев достигнуть предельной — потенциальной — помехоустойчивости.

Так, например, при обычной телеграфной передаче можно достаточно близко подойти к потенциальной помехоустойчивости, применяя в приемнике оптимальную ширину полосы частот [Л. 2] и ограничение по максимуму и минимуму.

При телефонной передаче как с амплитудной, так и с частотной модуляцией применяемые в настоящее время методы приема позволяют

также получить потенциальную помехоустойчивость, если помеха не превосходит некоторого порога, после которого напряжение от нее на выходе приемника перестает линейно зависеть от напряжения помехи на его входе.

Таким образом, в этих случаях одно усовершенствование приемников не сможет заметно увеличить помехоустойчивость радиосвязи.

7. Несколько иначе обстоит дело в случае, когда при телефонной передаче помеха превосходит упомянутый порог. В этом случае расчет помехоустойчивости становится затруднительным и поэтому нельзя сказать, достигли ли мы тут потенциальной помехоустойчивости или нет.

В частности, известно, что применяемый в настоящее время метод приема телефонии с частотной модуляцией при больших помехах не обеспечивает потенциальной помехоустойчивости.

Получить потенциальную помехоустойчивость может оказаться также затруднительно, если сигналы будут искажаться при распространении. Такие искажения, например, будут иметь место вследствие замираний при обычной амплитудной телеграфии на коротких волнах.

8. Перейдем к рассмотрению влияния одиночно-импульсных помех.

Есть ли в этом случае предел повышения помехоустойчивости, которую мы можем получить с помощью усовершенствования радио-приемников, без изменения методов модуляции, как это имело место при флюктуационной помехе?

Ответ на этот вопрос зависит от того, каков спектр импульсов, воздействующих на приемник.

Если предположить, что спектры всех импульсов помехи подобны, т. е. отличаются друг от друга лишь постоянными множителями и сдвигами фаз, обусловленными сдвигами импульсов по времени, то по крайней мере теоретически, усовершенствовав только приемник, можно повысить помехоустойчивость радиосвязи сколь угодно сильно.

Это видно, хотя бы из следующих соображений. Выделяя фильтром составляющие помехи из соседней с занимаемой сигналом области спектра, по ним при сделанном предположении можно узнать составляющие спектра помехи, наложившиеся на сигнал. Зная эти составляющие, можно, очевидно, создать их в приемнике и затем вычестить из принятого колебания и, таким образом, полностью уничтожить влияние помех.

Этот способ борьбы с помехами нельзя применить при флюктуационных помехах, так как, если импульсы от помехи в выделяющем ее фильтре будут накладываться друг на друга, то по ним нельзя будет однозначно установить спектр помехи в полосе сигнала.

Конечно, борьба с одиночно-импульсными помехами может успешно вестись и другими, отличными от описанного, методами. Данный метод борьбы с помехами приведен лишь для того, чтобы показать отсутствие предела повышения помехоустойчивости в данном случае.

Насколько на практике можно уменьшить влияние одиночно-импульсных помех и каким образом это лучше всего сделать, очевидно, будет зависеть от того, как спектры отдельных импульсов этой помехи будут отличаться друг от друга. Выяснить это сейчас нельзя из-за недостатка данных о таких помехах.

Очевидно, в этой области должна проводиться работа, которая, весьма вероятно, позволит значительно увеличить помехоустойчивость при одиночно-импульсных помехах.

В промежуточном случае помех, т. е. в случае, лежащем между флюктуационными и одиночно-импульсными помехами, исследование еще усложняется, и поэтому такой случай в данной статье не затрагивается.

9. Выясним теперь, насколько и как возможно увеличить помехоустойчивость связи путем изменения методов модуляции и манипуляции, не повышая средней мощности сигналов?

Ответ на этот вопрос особенно важно знать при флюктуационной помехе, поскольку, как было показано, при этих помехах без изменения методов модуляции можно надеяться получить увеличение помехоустойчивости лишь в отдельных, частных случаях.

При флюктуационных помехах, как уже говорилось, существует потенциальная помехоустойчивость, которую нельзя превзойти, но которую можно получить, применяя достаточно совершенный радиоприем. Поэтому и займемся выяснением, насколько изменением методов модуляции можно эту потенциальную помехоустойчивость увеличить.

10. Начнем рассмотрение с передачи телеграфных сигналов. Если взять уже рассмотренный случай, когда сигнал может иметь два значения $A(t)$ и $B(t)$, и принять, как это часто бывает,

$$B(t) = 0,$$

то потенциальная помехоустойчивость будет определяться согласно формулам (2) и (3) величиной

$$\alpha^2 = \frac{1}{2\sigma^2} \int_{-T/2}^{+T/2} A^2(t) dt.$$

Таким образом, оказывается, что она в данном случае будет определяться только энергией сигнала и не будет зависеть от его формы. Значит, изменение методов модуляции, т. е. формы сигнала, при такой передаче может лишь упростить прием и позволить легче достичь потенциальной помехоустойчивости, а не изменить ее величину. Так, например, при нестабильности частоты сигнала может оказаться затруднительным сужение полосы приемника до оптимальной, при которой реализуется потенциальная помехоустойчивость. В этом случае может оказаться целесообразным применение в качестве сигналов более коротких посылок, для которых оптимальная полоса будет шире [Л. 2].

11. В случае, когда мы применяем частотную манипуляцию, сигналы $A(t)$ и $B(t)$ имеют одинаковую огибающую, но разные частоты вписанной кривой. При этом потенциальная помехоустойчивость, как это можно получить из формул (2) и (3), будет при той же средней мощности передатчика такая же, как и в первом случае. При этом предполагается, что разница между частотами сигнала достаточно велика.

Выигрыш, наблюдаемый на практике при применении частотной манипуляции на коротких волнах, следует, очевидно, отнести за счет более совершенной борьбы в этом случае с замираниями, которые не дают возможности реализовать потенциальную помехоустойчивость при амплитудной манипуляции на коротких волнах, а также, возможно, за счет того, что помехи на этих волнах не имеют чисто флюктуационного характера.

12. Определим, каковы должны быть сигналы, чтобы потенциальная помехоустойчивость при заданной средней энергии сигналов была бы максимальной?

Для случая, когда сигнал может иметь два значения, анализ формул (2) и (3) показывает, что для этого нужно взять

$$B(t) = -A(t), \quad (4)$$

т. е. взять сигналы, противоположные по фазе. При том же значении средней энергии сигнала в этом случае величина α увеличится в 2 раза по сравнению с рассмотренными ранее случаями, т. е. потенциальная помехоустойчивость возрастет так, как если бы средняя энергия сигналов увеличилась в 2 раза.

В данном случае форма сигнала на величину потенциальной помехоустойчивости также влиять не будет, важно лишь соблюдение соотношения (4).

13. Для дальнейшего увеличения потенциальной помехоустойчивости при телеграфных сигналах нужно отказаться от метода компоновки сложных сигналов из элементарных двухзначных.

Система, в которой N знакам соответствует N любых ортогональных между собой колебаний, каждое из которых имеет максимальную заданную энергию, при $N \gg 2$, по всей видимости, обеспечивает практически максимальную потенциальную помехоустойчивость, возможную при данном числе знаков и данной энергии сигналов [Л. 1].

Примерами таких систем могут являться:

1) система, в которой разным знакам соответствуют одинаковые по форме, но разные по частоте сигналы;

2) система, в которой разным знакам соответствуют одинаковые по частоте и по форме посылки, сдвинутые по времени так, что при наложении сигналов они не совпадают.

При $N = 32$ при применении ортогональных сигналов получается по сравнению с обычной частотной или амплитудной телеграфией

с пятизначным кодом выигрыш в потенциальной помехоустойчивости, соответствующий увеличению мощности передатчика в 3.5 раза.

Этот способ передачи заслуживает еще и потому внимания, что при нем может оказаться более простой оконечная телеграфная аппаратура.

14. Перейдем к модуляции телефонного типа.

Известно, что при частотой и импульсной телефонной модуляции помехоустойчивость можно увеличить, расширяя полосу частот, занимаемую сигналом.

Однако, можно показать [Л. 1], что при передаче телефонного типа потенциальная помехоустойчивость для помех, меньших некоторого порога, может быть теоретически беспредельно увеличена без увеличения как мощности передатчика, так и полосы частот, занимаемой сигналом, но при этом будет одновременно уменьшаться и величина порога. Последнее невыгодно, так как при помехах, превышающих по интенсивности этот порог, влияние их на приемник резко возрастает. Следовательно, очень далеко идти в данном направлении нецелесообразно, однако таким способом можно создать методы модуляции более помехоустойчивые, чем имеющиеся в настоящее время системы с частотной и импульсной модуляцией, без дополнительного расширения полосы занимаемых частот.

Литература

1. В. А. Котельников. Докторская диссертация, 1947.
2. В. И. Сифоров. О влиянии помех на прием импульсных радиосигналов, Радиотехника. № 1, 1946.