

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕТЕОРНОГО РАДИОКАНАЛА ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Метеорная радиосвязь, существующая благодаря отражению метровых волн от ионизированных метеорных следов в атмосфере Земли, известна с середины 50-х годов и достаточно хорошо изучена [1]. С её помощью можно передавать небольшие объёмы информации на расстояния до 2000 км при сравнительно небольшой средней мощности передающего устройства. В 60-х – 80-х годах значительный интерес к этому виду связи был обусловлен её скрытностью и устойчивостью к аномальным явлениям атмосфере как естественного, так и искусственного происхождения. Кроме того, высокая степень взаимности метеорного радиоканала (равенство времени прямого и обратного распространения сигнала по трассе) позволяет использовать его для высокоточного сличения шкал эталонов времени.

Один из наиболее существенных факторов, сдерживающих применение метеорной связи в настоящее время — низкое значение средней скорости передачи данных и, следовательно, малая средняя пропускная способность, составляющая в лучшем случае несколько десятков – сотни бит/с.

Вместе с тем, теоретически достижимый объём информации, который может быть передан по метеорному радиоканалу, достаточно высок [2]. Поэтому имеет смысл рассмотреть, какими путями можно увеличить пропускную способность метеорного радиоканала. Для анализа одного из возможных резервов рассмотрим более подробно механизм образования и рассеяния следа.

Участок метеорного следа, принимающий участие в отражении, формируется за очень короткое время (несколько десятков миллисекунд), после чего начинается его постепенное разрушение, вызванное действием амбиполярной диффузии и рядом других факторов, подробно описанных в [3]. С точки зрения отражения радиоволн процесс разрушения следа сопровождается уменьшением амплитуды отражённого сигнала. Закон изменения амплитуды для ненасыщенного метеорного следа достаточно точно описывается уравнением

$$S(t) = S_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

где S_0 — значение амплитуды сигнала в момент формирования следа; τ — постоянная времени рассеяния следа, численно равная времени уменьшения амплитуды отражённого сигнала в 2,72 раза.

В зависимости от высоты формирования, начальной ионизации и ряда других факторов τ может составлять 30...300 мс. График зависимости (1) представлен на рис. 1. Для насыщенного метеорного следа характер зависимости более сложный: в течение времени его существования могут иметь место периодические изменения амплитуды, вызванные интерференцией сигналов, отражённых от нескольких «зеркальных точек».

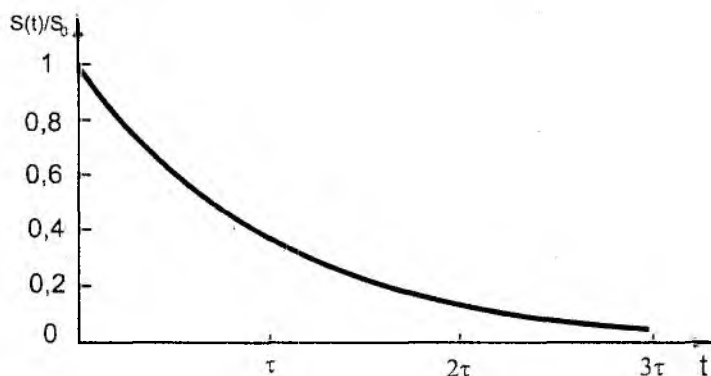


Рис. 1

Согласно формуле Шеннона предельная пропускная способность канала связи (бит/с) может быть выражена как

$$C = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S^2}{N^2} \right), \quad (2)$$

где ΔF — полоса пропускания канала; N^2 — мощность шума.

Ширина полосы пропускания метеорного радиоканала достаточно велика и ограничивается параметрами аппаратуры. Если исходить из того, что уровень шума в месте приёма за время сеанса связи существенно не изменяется, то объём информации, передаваемый за достаточно малый интервал времени dt , можно записать как

$$dV = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S_0^2 \cdot \exp(-2t/\tau)}{N^2} \right) dt. \quad (3)$$

График зависимости (3) представлен на рис. 2. Его можно интерпретировать как мгновенную скорость передачи данных, достижимую в каждый момент времени.

Теоретически достижимый объём информации, который может быть передан через метеорный след за всё время его существования, выражается как

$$V = \int_0^{\infty} \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S_0^2 \cdot \exp(-2t/\tau)}{N^2} \right) dt. \quad (4)$$

Данный интеграл в элементарных функциях не выражается, но численная оценка для $\Delta F = 10$ кГц показывает, что через метеорный след с постоянной времени $\tau = 300$ мс и отношением сигнал/шум в момент его формирования $S_0/N = 20$ дБ можно передать до 8 кбит информации.

Эти расчёты справедливы лишь в том случае, если скорость передачи в канале изменяется по мере изменения уровня принимаемого сигнала. Действительно, если при фиксированной скорости ($dV = \text{const}$) ориентироваться на высокий уровень сигнала в начале следа, то можно достичь высокой скорости, но на небольшом временном интервале (прямоугольник 1 на рис. 2). Если же с самого начала ориентироваться на использование всего времени существования метеорного следа, то скорость получается низкой (прямоугольник 2.)

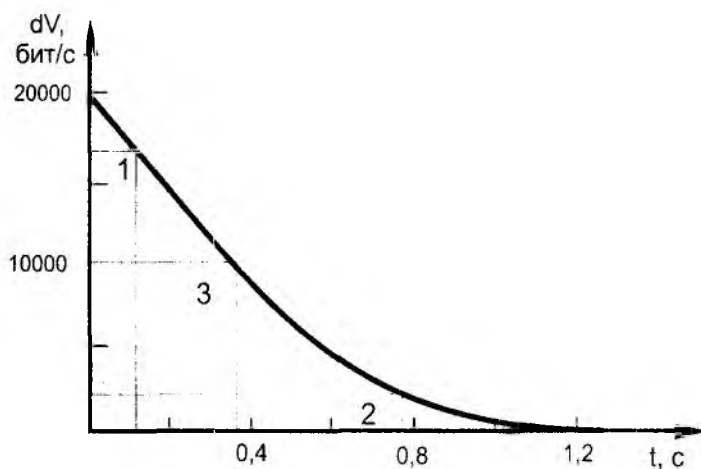


Рис. 2

И в одном, и в другом случае будут потери, размер которых графически интерпретируется как площадь под кривой на рис. 2, но вне соответствующего прямоугольника.

Можно показать, что оптимальной скоростью для конкретного следа будет такое её значение, при котором используется время существования равное $1,2\tau$ — прямоугольник 3 на рис. 2. Но даже в этом случае используется лишь 45 % потенциальной пропускной способности метеорного радиоканала. Задача усложняется тем, что в момент начала передачи (сразу после формирования следа) ни полное время его жизни, ни τ не известны, из-за чего пра-

вильно выбрать скорость оказывается невозможно. В существующих системах метеорной связи [1] используется фиксированная скорость передачи. Это приводит к тому, что эффективность использования метеорного следа оказывается ещё меньше, чем приведенная выше оценка в 45 %.

Таким образом, для повышения эффективности использования метеорного радиоканала необходимо применять переменную скорость передачи в зависимости от уровня отражённого сигнала как от сеанса к сеансу, так и в течение одного сеанса. При этом, как будет показано ниже, система становится адаптивной.

Рассмотрим вопрос технической реализации переменной скорости передачи данных по метеорному радиоканалу.

При использовании классических видов модуляции изменение скорости передачи сопровождается изменением ширины полосы частот, занимаемой спектром сигнала в эфире. Хотя ширина полосы частот, отражающихся от метеорного следа, достаточно велика и может составлять несколько мегагерц, изменение ширины спектра сигнала не может считаться приемлемым, поскольку в этом случае для получения ожидаемого выигрыша по помехоустойчивости необходимо изменять полосу пропускания приёмного устройства. Реализовать её быстрое изменение и обеспечить точность настройки приёмника при узкой полосе технически достаточно сложно. Поэтому есть смысл рассмотреть метод решения аналогичной задачи в модемной (телефонной) связи, где передача осуществляется в постоянной полосе частот, но скорость передачи при этом может изменяться в десятки раз за счёт применения специальных способов модуляции, позволяющих кодировать несколько информационных бит в одну информационную посылку. К таким видам модуляции относится относительная фазовая модуляция (ОФМ) и квадратурная амплитудная модуляция (КАМ).

ОФМ — это разновидность дискретной угловой модуляции, при которой фаза несущего колебания принимает фиксированные значения к моменту окончания информационной посылки модулирующего сигнала. В качестве модели модулирующего сигнала удобно рассматривать случайный синхронный телеграфный сигнал. Различают простую или двухфазную ОФМ (ОФМ-2), четырёхфазную (ОФМ-4), восьмифазную (ОФМ-8). ОФМ с большим количеством дискретных значений фазы в модемной связи, как правило, не применяется. В случае ОФМ-2 фаза несущего колебания может принимать значения 0 и 180°. В случае ОФМ-4 фаза несущего колебания может принимать четыре фиксированных значения, ОФМ-8 – восемь и т. д.

В том случае если для достижения заданного набега фазы используется минимально необходимая для этого частота, то этот вид модуляции называется также минимальной частотной модуляцией (МЧМ).

В случае КАМ информация содержится не только в значении фазы несущей, но и в её амплитуде. При использовании 32-позиционной КАМ за одну информационную посылку можно передать 9 бит данных [4].

Простой перенос методов, применяемых в модемной связи, в метеорную связь невозможен. С одной стороны, в отличие от телефонного канала связи, в метеорном нет искусственных ограничителей полосы пропускания. Также в нём отсутствует явление, называемое в телефонии «джиттер» или «дрожание фазы», то есть хаотическое изменение фазы несущего колебания, вызванное нестабильностью генераторов аппаратуры высокочастотного уплотнения. Ширина излучаемого спектра в метеорной радиосвязи ограничивается только разрешением контролирующих органов, а ошибка в определении фазы сигнала на приёмной стороне линии может быть вызвана только воздействием шумов и помех или нестабильностью собственных генераторов. С другой стороны, в метеорной связи уровень сигнала в месте

приёма может значительно изменяться от одного сеанса к другому, а в течение одного сеанса может подвергаться достаточно быстрым и глубоким замираниям, что не характерно для телефонных линий связи. Это вынуждает применять амплитудное ограничение в приёмном тракте.

Отсюда можно сделать вывод, что КАМ, более предпочтительная в телефонном канале, для метеорной связи оказывается неприемлемой, а ОФМ, напротив, может применяться даже с большим числом возможных значений поворота фазы, чем восемь.

Положительным обстоятельством применения данного метода можно считать то, что для его реализации не потребуются существенных изменений в электрической схеме приёмника, а в передатчике необходимо лишь установить модулятор, обеспечивающий фазовую модуляцию с нужной дискретностью. В основном все изменения касаются процедур обработки сигнала и алгоритма работы системы, которые реализуются программным путём.

Типовой алгоритм работы аппаратуры метеорной связи включает в себя процедуры обнаружения канала, разделения передаваемых данных на пакеты определённого объёма и последовательной передачи этих пакетов. Передача очередного пакета начинается только после получения подтверждения о неискажённом приёме предыдущего. Передача данных в очередном сеансе связи (через новый метеорный след) начинается с последнего неподтверждённого в предыдущем сеансе пакета.

Рассмотрим возможные алгоритмы работы линии метеорной радиосвязи при использовании переменной скорости передачи данных.

Наиболее простой алгоритм. Передача первого пакета в каждом сеансе всегда начинается на максимальной скорости. В случае получения подтверждения о неискажённом приёме этого пакета передача продолжается на той же скорости, а если получен запрос о повторе, то пакет повторяется на пониженной скорости. Дальнейшая передача также продолжается на пониженной скорости до получения очередного запроса о повторе, после которого скорость вновь снижается. Так происходит до тех пор, пока скорость не снижается до минимальной, обеспечивающей наименьшую вероятность битовой ошибки при сложившемся отношении сигнал/шум. Увеличивать скорость во время сеанса в расчёте на то, что предыдущие ошибки были вызваны замираниями, представляется нецелесообразным, поскольку замирания могут повторяться.

В более сложном алгоритме можно предусмотреть включение в сигнал подтверждения, посылаемый приёмной станцией, информации об уровне сигнала на приёмной стороне линии, что позволит упреждающим образом изменять скорость передачи.

Учитывая обратимость метеорного канала, приблизительную оценку уровня сигнала на одном конце радиолинии можно сделать по уровню сигнала на другом её конце. Введение в алгоритм процедуры измерения уровня принятого зондирующего сигнала позволит начинать передачу не с максимальной скорости, а с той, которая наилучшим образом соответствует состоянию канала. Таким же образом можно осуществлять изменение скорости передачи во время сеанса связи.

Оценим возможное увеличение пропускной способности метеорного радиоканала благодаря применению переменной скорости передачи данных в нём. На рис. 3 в виде кривой изображен график зависимости теоретически достижимой мгновенной скорости передачи для тех же параметров канала ($\Delta F = 10$ кГц, $\tau = 300$ мс, $S_0/N = 20$ дБ), а ступенчатой линией показано возможное изменение скорости при использовании соответствующих видов модуляции. Расчёт, сделанный для этого случая, показывает, что эффективность использования следа составляет уже на 45, а 75 %.

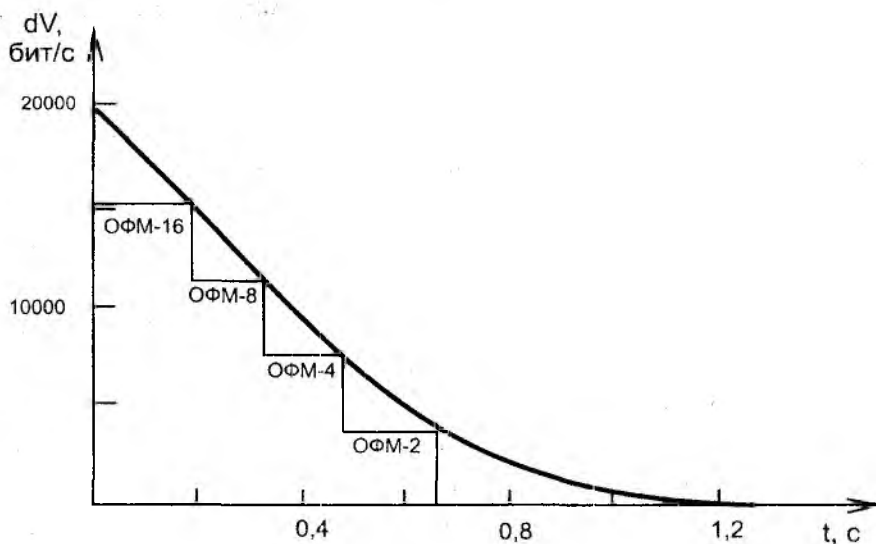


Рис. 3

Из-за дискретного характера изменения скорости и неизбежных потерь на повторение пакетов, принятых с ошибками, достичь теоретического предела не удаётся, однако возможно приблизиться к нему.

Список литературы: 1. *Метеоры сегодня* / Б. Л. Кашеев, Б. Г. Бондарь, В. И. Горбач, Ю. А. Коваль. Киев: Техніка, 1996. 196 с. 2. В. И. Горбач. Оценка средней пропускной способности аппаратуры МЕТКА-11 в режиме метеорной связи // Информационный Бюллетень Украинской Астрономической Ассоциации. Киев: ИПЦ «Наукова книга», 1996. № 9. С. 59 – 60. 3. Б.Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260 с. 4. О. И. Лагутенко. Модемы. Справочник пользователя связью / С.-Петербург: Лань, 1997. 368 с.

Харьковский национальный
университет радиотехники

Поступила в редколлегию 04.03.2004