

Системы телекоммуникации, связи и защиты информации

УДК 621.391

К.Г. Кебкал, канд. техн. наук

Усовершенствование протокола обмена данными по гидроакустическому каналу связи

Представлены результаты математического моделирования времени передачи данных по гидроакустическому каналу для случаев передачи данных пакетами и группами пакетов. Результаты этого моделирования подтверждены результатами физического эксперимента: продемонстрировано существенное увеличение эффективности использования гидроакустического канала связи и, соответственно, эффективной скорости передачи данных при осуществлении покластерной передачи данных вместо по пакетной.

There are represented the results of mathematical modeling of time of of packet-wise and cluster-wise data transmission via hydro-acoustic channel. The results of physical experiment confirm the results of mathematical model. There is represented the significant enhancement on efficiency of channel use and correspondingly enhancement on effective rate of data transmission during the use of cluster-wise data stream organization instead of packet-wise one.

Ключевые слова: гидроакустическая связь, подводная цифровая связь, гидроакустический модем.

Введение

В электрических и электромагнитных (сотовых) каналах, задержки распространения сигналов τ_d^r обычно принимают малые или пренебрежимо малые значения. При скорости распространения электромагнитных сигналов равной $3 \cdot 10^8$ м/с и протяженностях каналов порядка $10^0 \dots 10^3$ км задержка τ_d^r лежит в пределах от микро- до миллисекунд, а длительность передаваемых пакетов цифровых данных T_p^r обычно имеет порядок единиц или десятков миллисекунд. Например сотовые системы широко распространенного стандарта GSM предусматривают применение сот радиусом до 35 км ($\tau_d^r < 0,117$ мс), при этом определенная этим стандартом длительность передаваемого блока

данных (кадра) T_p^r составляет 4,615 мс [1, 2].

Другие широко распространенные системы цифровой связи – проводные системы – даже в случае передачи данных по длинным трансконтинентальным кабелям, передают пакеты данных с длительностями, существенно превышающими величину задержки распространения в канале. В частности при передаче данных по трансатлантическим кабелям протяженности участков между регенерирующими усилителями/мультиплексорами находятся в диапазоне 200...1000 км ($\tau_d^r < 3,3$ мс), [3–5], в то время как длительности передаваемых по кабелям пакетов данных обычно имеют порядок десятков или сотен миллисекунд.

Из изложенного выше следует, что для наиболее распространенных систем цифровой связи справедливо неравенство $\tau_d^r \ll T_p^r$. Следовательно, как проводной канал, так и канал наземной сотовой связи, можно условно охарактеризовать как канал без задержки распространения сигнала.

Очевидно, что в таких каналах все три наиболее распространенных протокола автоматического запроса повторной передачи поврежденных данных (ARQ) [6] могут использоваться с равновероятным успехом.

Несколько иная ситуация со спутниковыми системами цифровой связи. Основные глобальные спутниковые системы Iridium, Globastar (стандарт IS-95) предусматривают использование спутников на высотах 780...1400 км и при максимальном отклонении направления передачи данных от вертикали наклонная дальность связи может достигать 4400 км ($\tau_d^r < 14,7$ мс). При этом длительность передаваемого пакета данных (фрейма) T_p^r является соизмеримой величиной и составляет 20 мс [2]. Основные региональные спутниковые системы радиосвязи Thuraya, Gurada (стандарт GMR-1, GMR-2) предусматривают использование спутников на высотах около 2000 км. Линейные размеры территорий, на которых обеспечивается покрытие,

могут достигать 10000 км (покрытие Европы, Центральной Азии и Северной Африки [2]). В этом случае задержка распространения сигнала в канале может достигать $\tau_d^r = 33,3$ мс – величину, соизмеримую с длительностью блока данных (кадра) $T_p^r = 40$ мс [2] соответствующей региональной спутниковой системы. Следовательно для спутниковых систем цифровой связи задержка распространения τ_d^r является соизмеримой с длительностью блока данных T_p^r , и канал спутниковой связи можно условно охарактеризовать как канал с умеренной задержкой распространения.

В таких каналах наиболее простой по реализации протокол ARQ с остановками [6] обуславливает существенные потери времени на ожидание подтверждения о доставке данных (квитанции) от принимающей станции. Однако использование других протоколов, в частности ARQ с возвратом и ARQ с выборочной доставкой поврежденных пакетов [6], не препятствует достижению в таких каналах высоких значений эффективной скорости связи.

Иная ситуация наблюдается в подводных акустических каналах. При скорости распространения гидроакустического (г/а) сигнала около $1,5 \cdot 10^3$ м/с и протяженности канала связи до десяти километров, задержка на доставку квитанции τ_d^h может достигать 13,3 с. Такая продолжительная задержка может существенно превышать длительность передаваемого пакета цифровых данных T_p^h . Она имеет порядок времени когерентности канала связи, на практике составляет от сотен миллисекунд до единиц секунд [7, 8]. Следовательно $\tau_d^h \gg T_p^h$ и задержкой распространения сигнала в канале пренебрегать нельзя. В этом смысле г/а канал можно охарактеризовать как канал с продолжительной задержкой распространения сигнала.

В работе показано, что в силу сравнительно небольшой скорости распространения г/а сигнала эффективная скорость передачи данных может сильно отличаться от номинальной. Показано, что применение в г/а каналах стандартных (для цифровой радиосвязи, Интернета и пр.) протоколов обмена данными канального уровня является неэффективным. Для усовершенствования средств цифровой г/а связи предложен специализированный протокол канального уровня, учитывающий специфику г/а канала.

1. Усовершенствование протокола обмена данными канального уровня

Временная диаграмма обмена данными, соответствующая широко используемому протоколу обмена данными канального уровня в цифровой радио- или проводной связи (протокол автоматического запроса повторной передачи с остановками) [6], представлена на рис. 1, а. После отправки пакета данных, источник цифровой информации ожидает поступления подтверждения о их доставке в виде квитанции о целостности данных и только после получения подтверждения (ACK/NACK) передает следующий пакет. При использовании такого протокола в подводных акустических каналах связи время ожидания квитанции может быть соизмеримым с длительностью пакета данных, или значительно превышать его [1, 7, 9]. Приведем следующий пример, иллюстрирующий этот факт. Для надежной передачи цифровой информации длительность пакета данных T_{dp} (см. рис. 1, а) часто соизмерима со временем когерентности канала связи. Принимая во внимание сравнительно небольшую скорость распространения акустического сигнала в воде, время ожидания квитанции T_{2p} может существенно превышать длительность пакета данных T_{dp} (рис. 1, а). Очевидно, что в результате усреднения на интервале времени $T_{2p} + T_{dp} + T_{a1}$, где T_{a1} – длительность квитанции, эффективная скорость передачи данных ниже, чем скорость, достигаемая внутри интервала передачи пакета данных (обычно эту скорость называют номинальной).

Для сравнения номинальной и эффективной скоростей передачи данных, обозначим их как B_p и B_e^p соответственно, и запишем в следующем виде:

$$B_p = \frac{A_{dp}}{T_{dp}};$$

$$B_e^p = \frac{A_{dp}}{T_{dp} + T_{2p} + T_{a1}}, \quad (1)$$

где A_{dp} – количество информации, передаваемой в одном пакете.

Тогда отношение эффективной к номинальной скорости передачи данных может быть записано как

$$K_e^p = \frac{B_e^p}{B_p} = \frac{T_{dp}}{T_{dp} + T_{2p} + T_{a1}}. \quad (2)$$

Это отношение определяет коэффициент

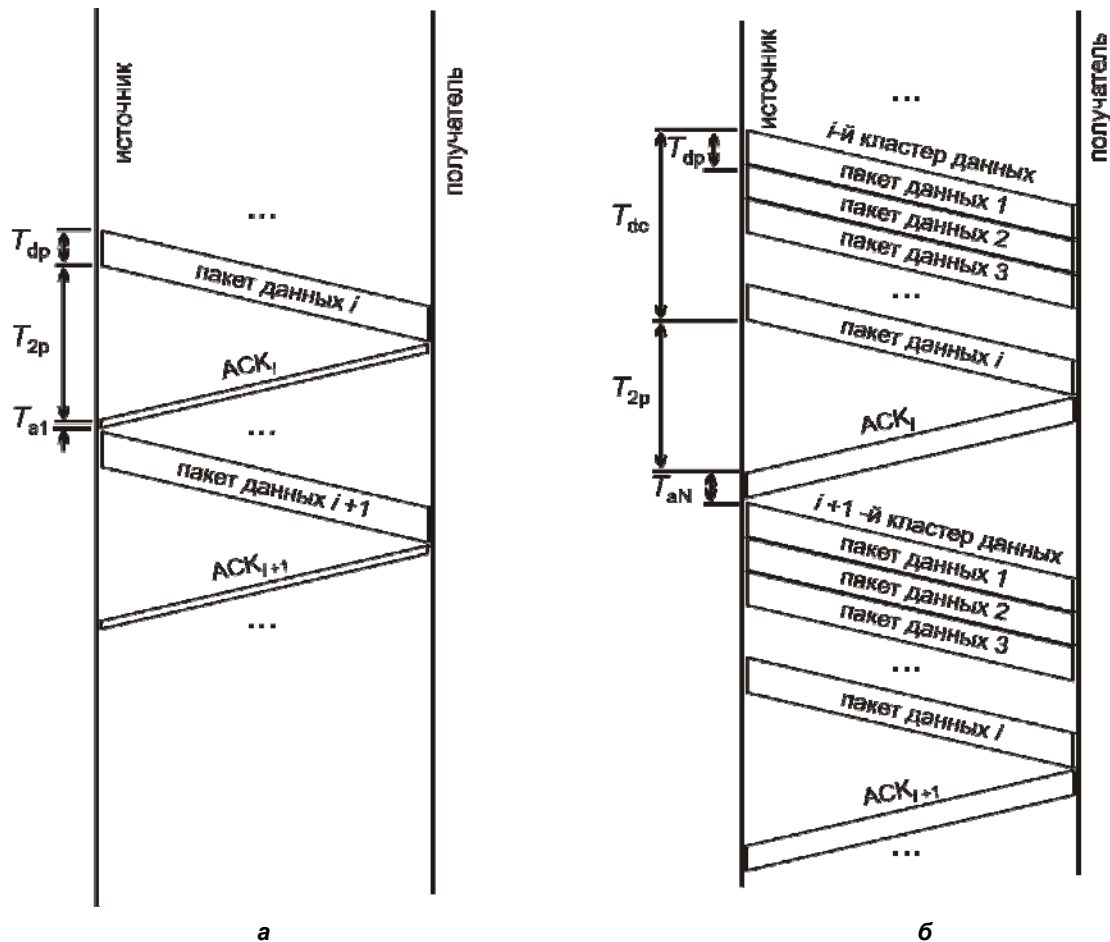


Рис. 1. Иллюстрация протокола обмена данными в разных случаях: а – по пакетному подтверждению доставки данных; б – покластерное подтверждение доставки данных

заполнения канала связи. Очевидно, что при возрастании коэффициента K_e^p , эффективная скорость передачи данных будет расти. Ниже изучена зависимость K_e^p от дальности связи.

Один из путей увеличения эффективной скорости передачи данных заключается в повышении номинальной скорости передачи данных (внутри интервала T_{dp}). Однако в результате усреднения номинальной скорости на интервале времени $T_{2p} + T_{dp} + T_{a1}$, возрастание эффективной скорости будет происходить медленно (тем медленней, чем больше дистанция связи). На рис. 2 представлена кривая, иллюстрирующая эту зависимость (штриховая линия). Зависимость построена для следующих условий: длительность пакета данных составляет 0,5 с, длительность квитанции – 0,1 с.

Как следует из рисунка, с увеличением дистанции связи происходит быстрое снижение коэффициента заполнения канала и, соответственно, эффективной скорости передачи данных. Например, на дистанции 100 м эффективная скорость имеет значение близкое к номинальной, а на дистанции 500 м эта скорость уже

вдвое меньше. В целом в диапазоне протяженностей каналов наибольшего практического интереса (т. е. от нескольких сотен метров до нескольких километров) коэффициент использования канала связи не превышает 0,4 (основная часть лежит в пределах 0,1...0,3).

Другой путь увеличения эффективной скорости передачи данных состоит в изменении организации обмена данными.

Протокол обмена данными может основываться на передаче не отдельных пакетов, а кластеров, состоящих из группы пакетов с данными. Временная диаграмма, соответствующая такому протоколу обмена, представлена на рис. 1, б. После отправки группы пакетов (кластера данных), источник цифровой информации ожидает поступления подтверждения о их доставке в виде составной квитанции о целостности данных в каждом из пакетов (составная квитанция содержит значения ACK/NACK для каждого из пакетов кластера). После получения подтверждения, источник передает следующий кластер. Количество передаваемых внутри кластера данных, отнесенное к длительности кластера, далее называется внутрикластерной скоростью.

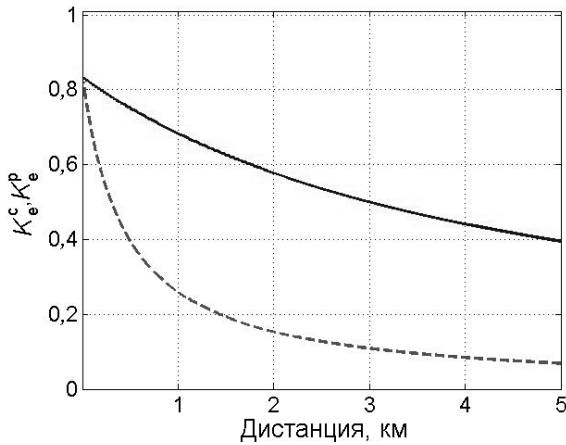


Рис. 2. Зависимости коэффициентов заполнения K_e^p и K_e^c от дистанции связи

При использовании такого протокола в подводных акустических каналах связи длительность кластера данных может существенно превосходить время ожидания составной квитанции. Для сравнения внутрикластерной и эффективной скоростей передачи данных, определим их как B_c и B_e^c соответственно, и запишем в виде

$$B_c = \frac{A_{dc}}{T_{dc}}, \quad B_e^c = \frac{A_{dc}}{T_{dc} + T_{2p} + T_{a1}},$$

где $A_{dc} = NA_{dp}$ — количество информации, передаваемой в кластере; T_{a1} — длительность составной квитанции о целостности данных. В случае следования пакетов данных без пауз (т. е. $T_{dc} = NT_{dp}$), эффективная скорость передачи данных может быть записана в следующем виде:

$$B_e^c = \frac{A_{dp}}{T_{dp} + \frac{T_{2p}}{N} + T_{a1}}. \quad (3)$$

Очевидно, что в определении эффективной скорости для покластерной передачи данных, интервал времени, с которым соотносится тоже количество передаваемых данных, является величиной меньшей, чем в выражении (1), и, соответственно, значение эффективной скорости в выражении (3) будет больше, чем в (1).

Следует отметить, что при комбинировании названных путей, т. е. как увеличении номинальной скорости, так и усовершенствовании протокола обмена данными, рост эффективной скорости передачи будет еще более существенным.

Ниже приведено отношение эффективной скорости к внутрикластерной скорости передачи данных:

$$K_e^c = \frac{B_e^c}{B_c} = \frac{NT_{dp}}{NT_{dp} + T_{2p} + NT_{a1}} = \frac{T_{dp}}{T_{dp} + \frac{T_{2p}}{N} + T_{a1}}.$$

Это отношение определяет коэффициент заполнения канала связи при покластерной организации обмена данными. На рис. 2 представлена зависимость K_e^c от дальности связи при прежних условиях, но для случая, когда данные передаются не пакетами, а кластерами по десять пакетов. Кривая, выполненная сплошной линией, иллюстрирует эту зависимость. Как следует из рисунка, в случае покластерной передачи данных при увеличении дистанции связи снижение коэффициента заполнения канала и, соответственно, эффективной скорости передачи данных, является сравнительно небольшим. В диапазоне дистанций наибольшего практического интереса коэффициент использования канала связи составляет 0,4 ... 0,7, что свидетельствует о многократном повышении этого коэффициента по сравнению со значениями, характерными для случая рассмотренной выше по пакетной передаче.

Отношение K_e^c / K_e^p представляет собой зависимость вида

$$R = \frac{K_e^c}{K_e^p} = \frac{T_{db} + T_{2p} + T_{a1}}{T_{db} + \frac{T_{2p}}{N} + T_{a1}}.$$

При заданной (по условиям задачи) длительности пакета данных и длительности квитанции, значение R будет зависеть от выбранного пользователем числа пакетов N в передаваемом сегменте данных, а также дистанции связи. Очевидно, что в протяженных каналах, где выполняется условие $T_{db} + T_{a1} \ll T_{2p}$, значение R будет стремиться к N , а в каналах малой протяженности, где выполняется условие $T_{db} + T_{a1} \gg T_{2p}$, значение R будет стремиться к единице. Таким образом, при работе в протяженных каналах для увеличения коэффициента использования канала связи важным является выбор достаточно большого числа пакетов N в сегменте данных. С уменьшением дистанции связи, выбор больших N становится менее существенным. График зависимости отношения K_e^c / K_e^p от дальности связи, рассчитанный для $N = 10$, приведен на рис. 3. Как следует из графика, с увеличением дальности связи, преимущества покластерной передачи данных становятся все более очевидными.

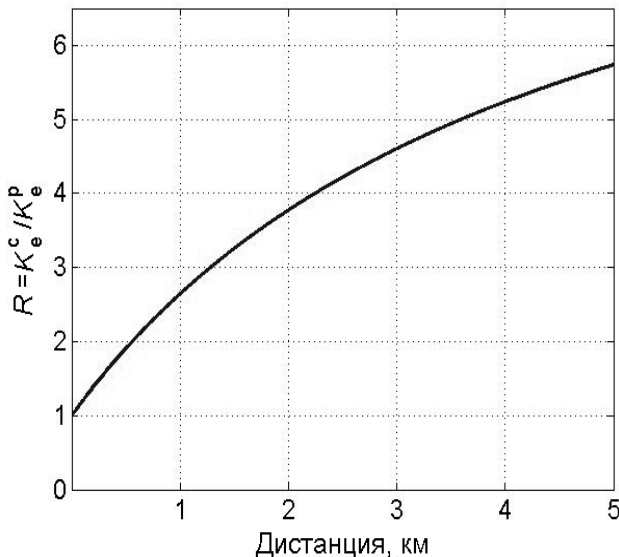


Рис. 3. Зависимость отношения K_e^C / K_e^P от дальности связи

Следует отметить, что зависимости K_e^C и K_e^P определяют лишь достижимые (максимальные) значения эффективной скорости передачи данных для каждой из дистанций связи. В действительности, в условиях сложной помеховой обстановки, возникновение поврежденных пакетов и соответственно необходимость их повторной передачи обычно приводит к снижению эффективной скорости передачи данных по отношению к максимально достижимым значениям. В этой работе анализ помех и интенсивности битовой ошибки, соответствующей данным помехам, не выполнялся. Однако, очевидно, что даже в отсутствие такого анализа предложенное в работе усовершенствование канального уровня (покластерная передача данных вместо по пакетной) будет обуславливать повышенную производительность средств цифровой г/а связи. Дело в том, что как при по пакетной, так и при по кластерной передаче воздействие помех будет приводить к случаям повреждения данных и соответственно квитанции NACK. Однако, если при по пакетной передаче квитанция NACK будет ассоциироваться с полной потерей времени распространения сигнала, то при по кластерной передаче квитанция NACK (на один или несколько пакетов кластера) будет ассоциироваться с потерей лишь части этого времени (обратно пропорционально числу пакетов в кластере). Тогда совокупные потери времени на доставку данных при использовании протокола по кластерной передаче будут меньше, а эффективная скорость выше.

2. Экспериментальная верификация результатов моделирования

Количественные характеристики усовершенствованного протокола обмена данными канального уровня были изучены при проведении экспериментов по передаче данных в каналах протяженностью от 100 до 2000 метров в окрестностях города Тулона (Франция) в сентябре 2006 и августе 2007 годов. Часть тестов выполнялась на внутреннем рейде Тулона (горизонтальные плоскопараллельные г/а каналы протяженностью от 100 до 275 м). Другая часть – на внешнем рейде Тулона (наклонные и вертикальные каналы протяженностью от 500 до 2000 м).

При проведении тестов обмен данными был организован следующим образом. На стороне источника данных г/а модем подключался к компьютеру-источнику данных (он всегда инициировал сессию обмена данными). На стороне получателя данных такой же г/а модем подключался к компьютеру-получателю данных (до поступления г/а сигнала, инициирующего сессию обмена данными, он всегда находился в состоянии «прослушивания» канала связи). После начала сессии данные от источника поступали в буфер модема и разбивались на сегменты. Каждый сегмент содержал последовательность из 10 пакетов данных. На принимающей стороне приемник формировал и отправлял составную квитанцию – маску подтверждения о доставке данных ACK/NACK. Модем на стороне источника данных формировал и передавал следующий сегмент и так далее до подтверждения приема всех данных. Каждый пакет содержал 480 бит информации (передавалась псевдослучайная последовательность чисел).

Г/а модемы, использованные для передачи данных, представляли собой устройства, способные выполнять адаптацию скорости передачи данных к свойствам г/а канала. Поэтому для обеспечения условия сравнимости коэффициентов заполнения канала связи при передаче данных на разные расстояния, для построения экспериментальных зависимостей (и далее, таблиц) использовались только такие фрагменты обмена, в которых передача данных осуществлялась с равной скоростью (в частности, около 1000 бит/с) и соответственно равной продолжительностью пакетов. При передаче данных с такой невысокой скоростью поврежденные (невосстановимые) пакеты в выбранных фрагментах обмена отсутствовали.

На рис. 4 приведены фрагменты сессии обмена данными при по кластерной передаче.

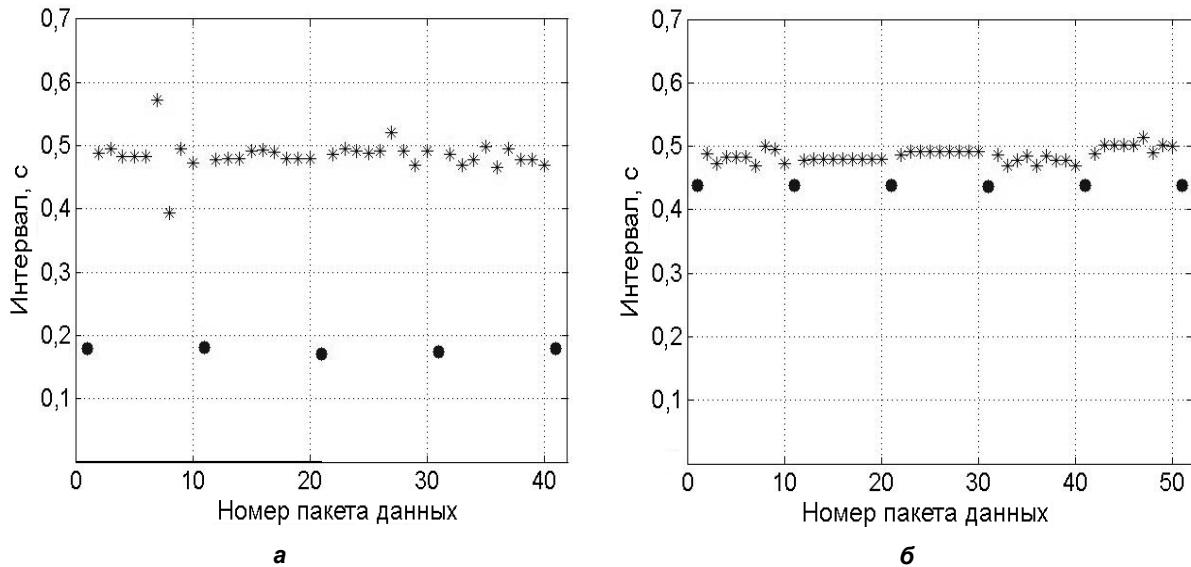


Рис. 4. Фрагмент сессии обмена данными (покластерная передача) на расстояние: а – 125 м; б – 275 м

По оси абсцисс отложены номера пакетов данных, а по оси ординат – интервалы времени, рассчитанные как разности моментов приема соседних пакетов. На рисунках круглыми маркерами обозначены значения интервалов между первым пакетом текущего кластера, и последним пакетом предыдущего (интервалы между кластерами). Как следовало ожидать, меньшим дистанциям связи соответствовали меньшие времена распространения сигналов в канале. Маркерами «звездочка» обозначены интервалы между пакетами внутри кластера. На обоих ри-

сунках длительности пакетов данных составляли приблизительно 0,49 с.

В таблице приведены сведения об интервалах времени между пакетами и кластерами, полученные из экспериментов по передаче данных на расстояния 504, 1002 и 2011 м. В третьей колонке, обозначенной литерой N , через наклонную черту приведено число пакетов, задаваемых при покластерной передаче, и число пакетов, задаваемых при по пакетной передаче данных.

Таблица

$D, м$	$T_{дп}, с$	N	$T_{2п}, с$	$T_{a1}, с$	K_e^p	K_e^c	R
123	0,494	10/1	0,166	0,095	0,6543	0,9498	1,4516
272	0,494	10/1	0,358	0,081	0,5295	0,9184	1,7345
504	0,502	10/1	0,679	0,110	0,3898	0,8646	2,2181
1002	0,511	10/1	1,351	0,104	0,2599	0,7784	2,9950
2011	0,490	10/1	2,710	0,119	0,1476	0,6340	4,2954

По данным таблицы на рис. 5 и 6 представлены экспериментальные зависимости коэффициентов K_e^c и K_e^p и их отношения на разных дистанциях связи. На рис. 6 данные таблицы представлены круглыми маркерами для покластерной передачи данных, и маркерами «звездочка» для по пакетной передачи данных.

Для обоих наборов построены аппроксимирующими кривыми (сплошная линия для покластерной передачи, штриховая – для по пакетной).

Из сравнения рис. 2 и 5 следует, что расчетные зависимости коэффициентов K_e^c и K_e^p

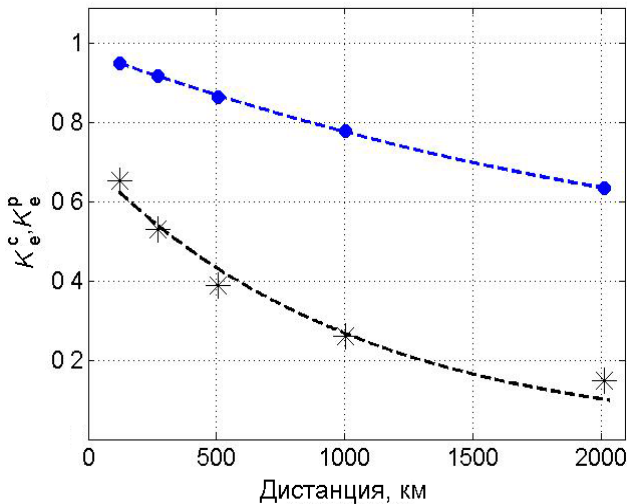


Рис. 5. Экспериментальные зависимости K_e^c и K_e^p от дистанции связи

хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями на всех дистанциях связи. На рис. 6 круглыми маркерами отображены экспериментальные значения отношения K_e^c / K_e^p на различных дальностях связи. Аппроксимирующая (сплошная линия) и расчетная (штриховая) кривые имеют близкие значения отношения R на каждой дистанции связи.

Умеренные различия расчетных и экспериментальных значений коэффициентов K_e^c и K_e^p , а также их отношения R , можно объяснять незначительными отклонениями длительностей пакетов данных, использованных в эксперименте, от длительностей, задаваемых при расчете значений. Также, эти различия могут объясняться отклонением профиля вертикального разреза скорости звука в месте проведения экспериментов, от профиля идеализированного разреза, принятого при получении расчетных значений коэффициентов.

Выводы

1. Большие задержки распространения г/а сигнала сильно ограничивают достижимую скорость передачи данных, требующих квитирования, а также делает применяемые, например, в радиосвязи или Интернете, протоколы обмена данными неэффективными (система связи вынуждена часто простаивать в режиме ожидания квитанции от принимающей стороны).

2. В работе представлен альтернативный сценарий обмена данными, в котором за один раз передается не пакет, а группа пакетов данных. В ответ на передачу группы пакетов, система ожидает приема составной квитанции о

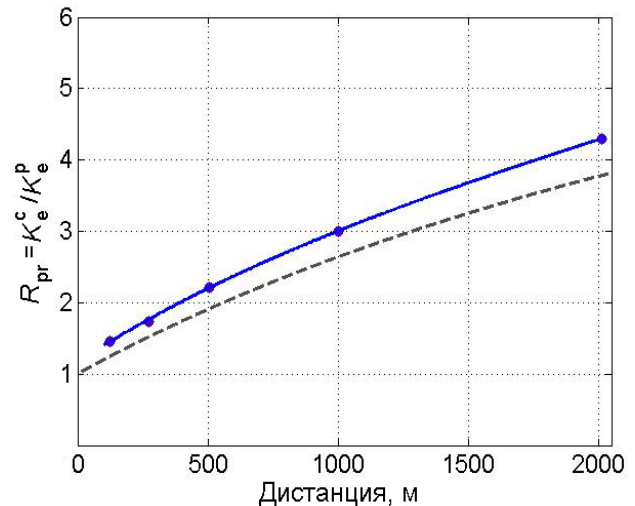


Рис. 6. Экспериментальные значения отношения R на разных дальностях связи

целостности данных в каждом из пакетов группы. При этом среднее время ожидания квитанции в пересчете на один пакет уменьшается и эффективность использования канала связи (коэффициент заполнения канала связи) растет. Пропорционально увеличению коэффициента заполнения канала связи возрастает эффективная скорость передачи данных.

Литература

1. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь // Сети связи с кодовым разделением. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – С. 415–421.
2. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи // Некоторые перспективные системы радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 2005. – С. 353–385.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – С. 132–177.
4. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave Russian Edition. – 2003. – № 1. – С. 22–28.
5. Кошелев А., Фильчаков А. Оптоволоконные сети и технология DWDM // Компьютер Пресс. – 2001. – № 1. – С. 1–12.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение: Пер. с англ. Е.Г. Гроза, В.В. Марченко, А.В. Назаренко, О.М. Ядренко. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
7. Kilfoyle D.B., Baggeroer A.B. The state of the art in underwater acoustic telemetry // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2000. – Vol.25, № 1. – P. 4–7.
8. Kebkal K.G., Bannasch R., Kebkal A.G. Ultra

sonic Link for Improved Incoherent Data-Transmission in Horizontal Shallow Water-Channels // Proceedings OCEANS 2003 (22–26 September 2003). – San-Diego, 2003. – P. 1786–1792.

9. *Stojanivic M., Catipoivic J.A., Proakis J.G.* Phase-Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1994. – Vol. 19. – P. 100–111.

НИЦ Вооружённых сил Украины «Государственный океанариум» г. Севастополь

Поступила в редакцию 24 октября 2008 г.