

УДК 621.391.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ В НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ В РЕЖИМЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ПОЧТА»

Н. М. Моторин,

адъюнкт

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Приводятся вероятностно-временные характеристики информационного обмена между наземными абонентами через низкоорбитальную спутниковую систему связи в режиме «электронная почта», полученные с помощью имитационного компьютерного моделирования. Рассматривается низкоорбитальная система связи, состоящая из 6 и 12 низкоорбитальных спутников-ретрансляторов. Определяется среднее время доставки сообщений абонентам, находящимся в различных районах земной поверхности в стандартном и оптимизированном режимах «электронная почта».

Investigation of probability-timing features of low earth orbit satellite message exchange system in e-mail mode using computer simulation, we study probability-timing features of information exchange between users of low earth orbit satellite communication system in e-mail mode. Communication systems consisting of 6 and 12 retransmitting satellites are considered. Average times of message delivery to users in different places of the Earth both in ordinary and optimized e-mail modes are determined.

В низкоорбитальных спутниковых системах связи одним из режимов передачи данных является режим «электронная почта» (ретрансляция с переносом), при котором сообщения, передаваемые одним абонентом, записываются в запоминающее устройство спутника-ретранслятора (СР) и передаются другому абоненту во время пролета СР в зоне его радиовидимости. Такой режим используется, например, в российской спутниковой системе пакетной передачи данных «Гонец-Д1». Он обеспечивает неоперативной связью труднодоступные районы, выполняет автоматический сбор данных с обслуживаемых и необслуживаемых объектов, а также данных с различного типа датчиков [1].

Перспективные низкоорбитальные спутниковые системы связи представляют собой многоспутниковые системы, для обеспечения связности включающие до нескольких десятков СР [2, 3]. Режим «электронная почта» реализуется, как правило, в неполносвязных низкоорбитальных спутниковых системах связи, орбитальная группировка которых не превышает десятка СР. Это может иметь место на этапе развертывания системы или в тех случаях, когда система предназначена для решения специальных задач, допускающих неоперативную связь и передачу данных. Так, в системе «Гонец-Д1», име-

ющей в настоящее время орбитальную группировку из 6 СР, расположенных на круговых орбитах высотой 1500 км с наклоном $82,5^\circ$, заявленное максимальное время доставки сообщения абоненту составляет 12 ч. Это – максимальная задержка передачи сообщения при наихудшем взаимном расположении абонентов, а также при подаче заявки абонентом-отправителем в момент максимального перерыва между зонами радиовидимости с СР.

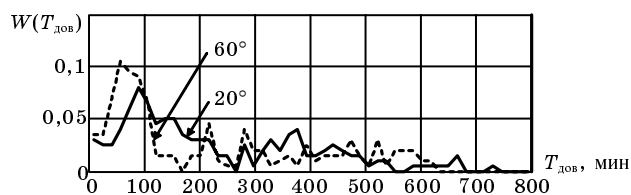
Режим «электронная почта» не предназначен для непрерывного обслуживания абонентов, но при соответствующем выборе параметров орбит СР обеспечивает глобальность обслуживания. Наибольший практический интерес в такой ситуации представляет определение времени доведения сообщений. Для исследования вероятностно-временных характеристик задержки передачи сообщений между абонентами низкоорбитальной системы спутниковой связи в режиме «электронная почта» при различном взаимном расположении абонентов было проведено имитационное компьютерное моделирование.

Имитационная модель низкоорбитальной системы спутниковой связи была разработана и реализована в виде специализированного программного комплекса в соответствии с общим подходом к моделированию спутниковых радиосетей [4]. Модель позволя-

ет определять время доставки сообщений в низкоорбитальной системе спутниковой связи с заданной баллистической структурой орбитальной группировки при различном расположении ее наземных абонентов для отдельных моментов времени поступления заявок на передачу, а также в среднем по ансамблю реализаций. Для этого с привязкой к реальному времени моделируется динамическая топология орбитальной группировки системы, определяется положение СР на орбитах и наличие у наземных абонентов условий радиовидимости СР. В дальнейшем результаты, полученные для интересующих интервалов времени и географических районов расположения абонентов, подвергаются статистической обработке.

В качестве исходных данных рассматривалась орбитальная группировка, состоящая из 6 СР, равномерно расположенных на двух перпендикулярных орбитах с высотой 1500 км и наклоном 83°. Для получения плотности распределения времени доведения сообщений при их передаче между абонентами низкоорбитальной системы спутниковой связи расположение одного абонента считалось неизменным (абонент-отправитель), а расположение второго абонента (абонент-получатель) выбиралось случайно по равномерному закону в заданной области. При этом из рассмотрения исключались районы, находящиеся в зоне непосредственной ретрансляции низкоорбитального СР, и расположение абонента-получателя выбиралось на расстоянии не менее 5000 км от абонента-отправителя, что соответствует характерному размеру зоны радиовидимости низкоорбитального СР на поверхности Земли.

Данные допущения позволили получить усредненное время доведения передаваемых сообщений в режиме «электронная почта» в зависимости только от положения одного из абонентов в различных (по дальности и широте) районах земной поверхности. Интервалы времени между поступлением заявок на передачу сообщений у абонента-отправителя задавались генератором случайных чисел с экспоненциальным распределением, а для запо-



■ Рис. 1. Плотность вероятности времени доведения сообщений в системе с 6 СР (2×3), стандартный режим «электронная почта»

минающего устройства (буферной памяти) СР предполагалась невозможность переполнения при функционировании системы. Значения времени задержки передачи сообщений оценивались на интервале времени 1 месяц, что обеспечивает достаточную представительность полученной статистической выборки.

Время задержки передачи сообщения складывается из времени ожидания связи с СР абонентом-отправителем и времени его переноса до момента входа СР в зону радиовидимости абонента-получателя. Рассматривались два случая расположения абонента-получателя сообщений. Первый случай соответствует расположению абонента-получателя в любой точке земной поверхности и дальности между абонентами свыше 5000 км. Второй случай соответствует расположению абонента-получателя на широтах между 40° и 80° с. ш. при дальности между абонентами от 5000 до 10000 км. В результате имитационного моделирования были получены среднее время ожидания связи с СР $T_{\text{ож}}$ и среднее суммарное время доведения сообщения до абонента-получателя $T_{\text{дов}}$ в зависимости от широты расположения абонента-отправителя (табл. 1). Плотности вероятности времени доведения сообщения до абонента-получателя $W(T_{\text{дов}})$ представлены на рис. 1 (здесь и в дальнейшем принято расположение абонента-отправителя на широте 20° и 60° с. ш. и абонента-получателя по всей поверхности Земли).

■ Таблица 1

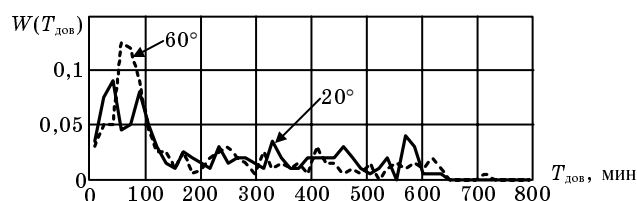
№ п/п	Широта расположения абонента-отправителя, град с. ш.	Расположение абонента-получателя			
		Вся земная поверхность, дальность свыше 5000 км		Широта 40–80° с. ш., дальность 5000–10 000 км	
		$T_{\text{ож}}$, мин	$T_{\text{дов}}$, мин	$T_{\text{ож}}$, мин	$T_{\text{дов}}$, мин
1	0	63,6	244,1	63,9	196,5
2	20	58,3	242,6	58,2	182,8
3	40	34,8	233,4	34,7	169,4
4	60	13,2	228,7	13,0	156,2
5	80	6,2	224,5	4,2	139,2

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что при увеличении широты расположения абонента-отправителя время ожидания связи с СР существенно снижается, что объясняется меньшими перерывами между входами низкоорбитальных СР в зоны радиовидимости абонентов в приполярных районах. Это характерно для рассматриваемой орбитальной группировки низкоорбитальной системы спутниковой связи с наклоном орбит СР 83° . При этом в первом случае осреднения по всей земной поверхности среднее суммарное время доведения сообщения уменьшается незначительно, а во втором случае осреднения по выбранной широтной области земной поверхности ($40-80^\circ$ с. ш.) и в диапазоне дальностей ($5000-10\ 000$ км) среднее суммарное время доведения уменьшается примерно на величину уменьшения среднего времени ожидания связи с СР.

Выбранные характеристики низкоорбитальной системы спутниковой связи близки к характеристикам системы «Гонец-Д1». Хотя при моделировании не учитывались возмущения орбит СР и связанные с ними нарушения топологии (деградация) орбитальной группировки на интервале анализа, полученные результаты моделирования для среднего времени доведения сообщений ($T_{\text{дов}} \leq 4$ ч) можно оценить как значительно превосходящее по оперативности заявленное максимальное время доставки сообщений в системе (12 ч).

Поскольку в настоящее время ведутся работы по развертыванию системы «Гонец-Д1М» второго этапа, состоящей из 12 СР (4 плоскости по 3 СР в каждой, высота орбиты 1500 км, наклонение 83° , плоскости орбит разнесены по долготе восходящего узла на 45°), было проведено имитационное моделирование низкоорбитальной системы спутниковой связи с аналогичными характеристиками. В результате были получены плотности вероятности времени доведения сообщений между абонентами $W(T_{\text{дов}})$ (рис. 2).

Результаты моделирования показывают, что в первом случае (абонент-отправитель на широте 20° с. ш.) среднее время ожидания связи с СР абонентом-отправителем составило 10,8 мин, а среднее суммарное время доведения сообщения СР – 184,2 мин, а во втором случае (абонент-отправитель на широте 60° с. ш.) – среднее время ожидания связи составило 7,2 мин, а среднее время до-



■ Рис. 2. Плотность вероятности времени доведения сообщений в системе с 12 СР (4×3), стандартный режим «электронная почта»

ведения сообщения – 156,4 мин. В данном случае полученное по результатам моделирования среднее время доведения сообщения оказалось более чем в 2 раза выше, чем заявленное для системы «Гонец-Д1М» – 70 мин. Это обусловлено тем, что основной вклад в суммарное время доведения сообщения вносит время его переноса на СР, которое не зависит от состава орбитальной группировки системы.

Таким образом, в случае увеличения состава орбитальной группировки низкоорбитальной спутниковой системы связи вдвое и использования в ней только стандартного режима «электронная почта» среднее время доведения сообщений снизилось на 26%, что достигается в основном уменьшением среднего времени ожидания связи с СР абонентом-отправителем. При этом среднее время переноса сообщения на СР не зависит от состава орбитальной группировки системы, и для его дальнейшего уменьшения необходимо изменение режима передачи сообщений.

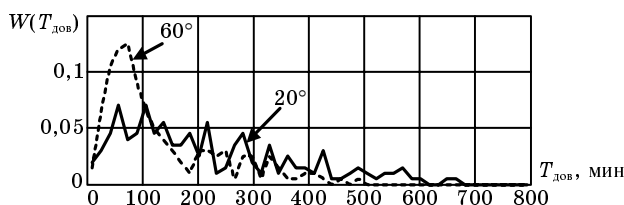
Одним из способов уменьшения задержки переноса сообщений при организации между абонентами системы информационного обмена в режиме «электронная почта» является прогнозирование положения СР в орбитальной группировке и выбор маршрута переноса сообщения, обеспечивающего его минимальную задержку. В результате передаваемые сообщения будут ретранслироваться абонентом-отправителем не на первый оказавшийся в зоне его радиовидимости СР из состава низкоорбитальной системы спутниковой связи (стандартный режим ретрансляции), а на тот СР, который за минимальное время доведет сообщение до абонента-получателя (оптимизированный режим ретрансляции).

Для реализации поиска кратчайшего пути переноса сообщения необходимо, чтобы в аппаратуре потребителя поддерживался альманах низкоорбитальной системы спутниковой связи, благодаря которому абонент-отправитель сообщения владеет информацией о текущем положении СР системы и о траекториях их движения относительно своего положения и положения абонента-получателя сообщения. При определении маршрута передачи сообщения между абонентами с минимальной задержкой на этапе подготовки сообщения к отправке требуется выполнить вычисление задержек передачи сообщения по всем возможным маршрутам, которые складываются из времени ожидания абонентом-отправителем связи с СР и времени переноса им сообщения до абонента-получателя, а затем из полученной совокупности всех возможных маршрутов передачи сообщения выбирается маршрут с минимальным временем доведения сообщения.

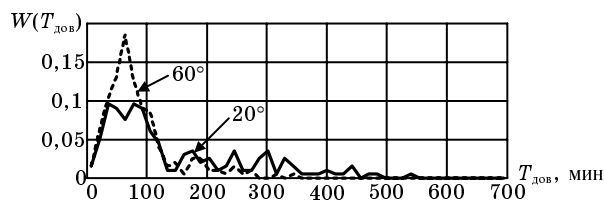
Результаты имитационного моделирования доставки сообщений абонентам в низкоорбитальной системе спутниковой связи в оптимизированном режиме «электронная почта» при использовании

■ Таблица 2

№ п/п	Широта расположения абонента-отправителя, град с. ш.	Расположение абонента-получателя			
		Вся земная поверхность, дальность свыше 5000 км		Широта 40–80° с. ш., дальность 5000–10 000 км	
		$T_{ок}$, мин	$T_{дов}$, мин	$T_{ок}$, мин	$T_{дов}$, мин
1	0	82,4	214,7	75,9	176,1
2	20	69,8	211,8	71,2	167,5
3	40	55,4	181,0	45,6	139,2
4	60	41,2	128,8	31,5	103,0
5	80	19,2	88,7	11,1	66,3



■ Рис. 3. Плотность вероятности времени доведения сообщений в системе с 6 СР (2×3), оптимизированный режим «электронная почта»

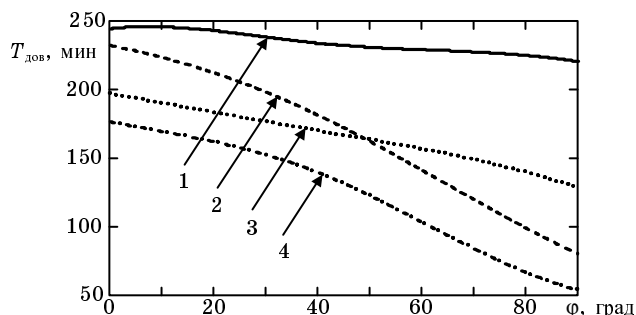


■ Рис. 4. Плотность вероятности времени доведения сообщений в системе с 12 СР (4×3), оптимизированный режим «электронная почта»

предложенного способа выбора маршрута передачи представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Сравнение результатов моделирования, представленных в табл. 1 и 2, показывает, что на равных широтах расположения абонента-отправителя сообщений среднее время ожидания связи с СР в случае оптимизированного режима «электронная почта» больше, чем для стандартного, а среднее суммарное время доведения сообщения – меньше. Это объясняется передачей сообщения абонентом-отправителем не на первый СР, оказавшийся в зоне его радиовидимости, а на тот, который с минимальной задержкой доставит его до абонента-получателя. Выигрыш в среднем суммарном времени доставки сообщений составляет до 2–2,5 раз и наиболее заметен на высоких широтах расположения абонента-отправителя. При этом для широт абонента-отправителя, расположенного выше 60° с. ш. – при доставке сообщений по всей поверхности Земли, и выше 20° с. ш. – при доставке сообщений на расстояние до 10 000 км в широтной области 40–80° с. ш., выполняется заявленное для системы «Гонец-Д1М» время переноса сообщений до 70 мин.

Плотности вероятности времени доведения сообщений в оптимизированном режиме «электронная почта» для орбитальной группировки низкоорбитальной системы спутниковой связи, состоящей из 12 СР (4 плоскости по 3 СР в каждой, высота орбиты 1500 км, наклонение 83°, плоскости орбит разнесены по долготе восходящего узла на 45°),



■ Рис. 5. Среднее время доведения сообщений в системе с 6 СР (2×3) в зависимости от широты расположения абонента-отправителя

представлены на рис. 4. Среднее время ожидания связи с СР абонентом-отправителем на широте 20° с. ш. составляет 29,6 мин, а среднее суммарное время доставки сообщения – 138,1 мин. Для широты расположения абонента-отправителя 60° с. ш. время ожидания связи с СР и среднее суммарное время доставки сообщения составляют соответственно 20,1 и 78,2 мин.

Выигрыш во времени доведения сообщений при использовании оптимизированного режима передачи в режиме «электронная почта» иллюстрируется графиками (рис. 5). Здесь представлены зависимости среднего суммарного времени доведения

сообщения $T_{\text{дов}}$ от широты расположения абонента-отправителя при стандартном и оптимизированном режимах передачи. Кривые 1 и 2 соответствуют стандартному режиму «электронная почта», кривые 3 и 4 – оптимизированному режиму «электронная почта». Кривые 1 и 3 соответствуют расположению абонента-получателя сообщения на всей поверхности Земли, кривые 2 и 4 – расположению получателя в области между широтами 40° и 80° с. ш. с дальностью между абонентами от 5000 до 10 000 км соответственно. Из графиков следует, что выигрыш при использовании оптимизированного режима «электронная почта» растет при увеличении широты абонента-отправителя сообщений. Это обусловлено уменьшением интервалов между входами в зону его радиовидимости с СР из состава низкоорбитальной системы спутниковой связи.

В результате выполненных исследований вероятностно-временных характеристик информационного обмена между абонентами низкоорбитальной системы спутниковой связи в режиме «электронная почта» можно сделать следующие выводы:

– в случае использования в низкоорбитальной системе спутниковой связи приполярных орбит время передачи (доведения) сообщений между абонентами системы в режиме «электронная почта» в значительной степени зависит от широты их расположения, при увеличении широты расположения абонентов системы время передачи сообщений между ними уменьшается;

– увеличение состава орбитальной группировки низкоорбитальной системы спутниковой связи, использующей стандартный режим «электронная почта», приводит к незначительному уменьшению времени передачи сообщения, что обусловлено только уменьшением времени ожидания связи с СР абонентом-отправителем сообщения;

– для эффективного использования низкоорбитальной системы спутниковой связи в режиме «электронная почта» целесообразно использовать оптимизированный режим с выбором маршрута переноса сообщения, обеспечивающим минимальное суммарное время доведения сообщения; выигрыш при использовании оптимизированного режима «электронная почта» возрастает с увеличением числа СР в составе орбитальной группировки, что обусловлено увеличением возможных вариантов маршрутов передачи сообщения.

Литература

1. Невдяев Л. М., Смирнов А. А. Персональная спутниковая связь. М.: Эко-Трендз, 1998. 216 с.
2. Спутниковая связь и вещание: Справочник / Под ред. Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1988. 344 с.
3. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые системы связи. М.: Альпина Паблишер, 2004. 536 с.
4. Имитационное моделирование спутниковых радиосетей / Н. Л. Важенин, Ю. М. Галантерник, А. А. Каплунов и др.; НИИ ТП. М., 1993. 80 с.