

ВОЗМОЖНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

М. Н. Андрианов¹, Д. А. Корбаков², В. Н. Пожидаев²

¹ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

² Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 18 августа 2020 г.

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения высокой скорости и достоверности передачи данных спутниковой линии связи в условиях Арктики. Показаны возможные орбиты спутников, особенности распространения радиоволн миллиметрового диапазона с учётом гидрометеорологических особенностей арктической зоны.

Ключевые слова: спутниковая связь, телекоммуникации, распространение радиоволн, миллиметровые волны, Арктика, широкополосный интернет.

Abstract. The issues of ensuring high speed and reliability of data transmission of a satellite communication line in the Arctic are considered. The main problem for the millimeter wave implementation is the possible meteorological conditions for radio wave propagation in the cold time of a year. The vertical profiles of meteorological data for a couple of islands in the Arctic Ocean had been used for the calculations of the molecular absorption on a possible communication link. The very simple model for the possible rain attenuation on such link had been proposed. Possible satellite orbits for the link budget calculations have been copied from the existing satellite system “Gonetz”, operating at frequencies 300/400 MHz. The calculation results show that the satellite communication in millimeter waves in the Arctic conditions is possible.

Key words: satellite communications, telecommunications, radiowave propagation, millimeter waves, the Arctic meteorological data.

Введение

В настоящее время повышенное внимание направлено на развитие Арктики и районов Крайнего севера, что обусловлено национальными интересами нашей страны. При этом наличие качественной связи является обязательным условием. Существующие на сегодняшний день телекоммуникационные системы не могут обеспечивать каналы связи с достаточной пропускной способностью для качественной передачи данных. Возможным решением вопроса широкополосной связи с удаленными районами Арктики является использование спутниковых группировок. Целью данной работы является изучение возможности применения миллиметровых волн (ММВ) для организации связи в районах Крайнего Севера и Арктики посредством использования низкоорбитальных спутников с системой терминалов с очень маленькой апертурой (VSAT).

Перспективность применения ММВ в атмосферных радиоканалах обусловлена многими преимуществами этого диапазона по сравнению с сантиметровым (СМ) и дециметровым (ДМ), особенно возможностью формирования узких пучков передачи и приема излучения с угловой шириной в несколько градусов, коэффициентами усиления 30...40 дБ и при малых апертурах приемных антенн (около 0.5 м). Кроме того, в условиях насыщенности электромагнитного спектра использование ММВ эффективно решает проблему электромагнитной совместимости.

Основными проблемами при исследовании возможности реализации спутниковых линий связи для Арктики являются выбор орбиты движения спутника (спутников), оценка затухания в свободном пространстве на трассе распространения радиоволн, поглощение радиоволн атмосферными газами при характерных метеорологических условиях и возможное затухание в гидрометеорах. В этой работе мы постараемся рассчитать такую линию связи и дать оценку возможности осуществления передачи информации по высокоскоростному каналу ММВ в Арктических широтах.

1. Обоснование спутниковых линий связи по критериям возможных орбит космического аппарата и гидрометеорологических особенностей арктической зоны

В качестве прототипа спутника (КА) была выбрана существующая спутниковая система «Гонец». Двенадцать спутников расположены на высоте около 1400 км, движутся почти по круговым орбитам с полным временем обращения 114 мин. Линии связи работают на частотах 300/400 МГц. Эта система обеспечивает подвижную помехозащищенную связь и передачу данных в удаленных и труднодоступных районах, включая территории Крайнего Севера. Некоторые характеристики системы приведены ниже:

- Скорость движения спутника – 7.16 км/с,
- Наклонение орбиты – 82.5° ,
- Диаметр зоны покрытия одного спутника – 5000 км.

Поэтому принимаем существующие параметры орбит движения аппаратов и исследуем применимость для связи гигагерцового (ММВ) диапазона волн в климатических условиях Арктики. Для конкретных расчетов выберем два острова: остров Визе (79° с.ш.) и остров Врангеля (70° с.ш.).

Если смоделировать траекторию движения спутника как круг радиусом 7800 км вокруг сферической Земли, то из геометрических соображений можно определить и углы места на спутник из точки наблюдения, и дальности до спутника при его непрерывном движении по орбите. Если мы примем, что связь со спутником реализуется только тогда, когда его угол места более 10° , то получаются следующие величины: время пролета спутника через точку зенита над приемным пунктом 16.5 мин, дальность до спутника, когда его угол места 10° , составляет около 4040 км. При движении спутника эта дальность уменьшается до 1400 км, когда он в зените, и снова нарастает до 4040 км. При этом углы места увеличиваются от 10° до 90° , а затем также спадают.

Рассмотрим величины ослабления радиоволн на рассматриваемых спутниковых линиях связи в Арктике. Найдем молекулярное поглощение, которое будет присутствовать всегда, и ослабление в дождях в летнее время

года. Другие метеоявления (облака, туманы) не учитываются из-за малой вероятности их появления в данных метеоусловиях.

Зенитное поглощение для выбранных географических пунктов будет рассчитываться для января и для июля по опубликованным данным по высотным профилям метеозаэлементов [1]. Характерные приземные значения среднемесячных параметров воздуха: давления P (мб), температуры T (С) и абсолютной влажности a (г/м³) для двух месяцев приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Пункт	Месяц	P (мб)	T (С)	a (г/м ³)
о. Визе	январь	1013.	-27.0	0.39
о. Визе	июль	1007.	0.0	3.95
о. Врангеля	январь	1024.	-23.8	0.43
о. Врангеля	июль	1011.	2.1	4.25

Расчеты молекулярного поглощения на каждой из заданных высот проводятся по приближенной методике, приведенной в [2]. После чего происходит интегрирование по высоте, и получаются значения зенитного поглощения, которые приведены в таблице 2, и выражены в дБ.

Таблица 2

F , ГГц	30	40	70	80	90
о. Визе, январь	0.22	0.58	2.05	0.51	0.30
о. Визе, июль	0.21	0.45	2.08	0.71	0.58
о. Врангеля, январь	0.22	0.57	2.10	0.57	0.32
о. Врангеля, июль	0.22	0.45	2.09	0.75	0.65

Для расчета поглощения радиоволн на наклонных трассах с углами места ϑ более 10° табличные значения надо разделить на $\sin\vartheta$. Для $\vartheta = 10^\circ$ величина

$1/\sin\theta$ равна 5.67, т. е. это максимальное число, на которое могут быть умножены данные таблицы 2.

В данной работе не проводятся конкретные расчеты молекулярного поглощения на рассматриваемой линии связи, поскольку это связано с взаимным положением наземного пункта и движущимся спутником, так что углы места трассы непрерывно меняются. Требования к запасу линии связи на ослабление также непрерывно меняются. Однако в 80-х годах прошлого века проводились многочисленные эксперименты по изучению работоспособности спутниковых линий связи в гигагерцовом диапазоне при связи между наземным пунктом и ИСЗ на геостационарной орбите. Высота орбиты спутника при этом составляет 36000 км, что существенно больше характерных дальностей в нашем случае. Поскольку аппаратура для диапазона ММВ стабильно работала при таких дальностях, то и для наших задач ее работоспособность должна реализовываться. Наиболее предпочтительным является диапазон около 30 ГГц, обладающий наименьшим затуханием.

Расчет возможного ослабления радиоволн в гидрометеорах не является приоритетным, поскольку дожди могут быть только летом, а в сухих снегопадах ослабление радиоволн мало. Этот расчет представляет собой непростую задачу из-за сугубо вероятностного распределения параметров зоны дождя. Так для каждого пункта существует вероятностное распределение (по времени) дождей различной интенсивности, причем эти распределения могут существенно меняться год от года. Пространственное распределение интенсивности дождя внутри зоны дождя носит случайный характер, и существующие пространственные модели получены в результате усреднения по большому числу дождей в не арктических климатических районах.

В материалах Международного Союза Электросвязи (МСЭ) [3] земной шар условно разбит на несколько зон дождя, причем Арктике соответствует зона А. Среднее вероятностное распределение интенсивности дождя R в мм/час для этой зоны приведено в Таблице 3.

Таблица 3

P, %	1.0	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
R, мм/ч	<0.1	0.8	2	5	8	14	33

Здесь P – это вероятность появления дождя с такой или меньшей интенсивностью за год. Практически эта вероятность выражается в количестве минут за год. Модель погонного ослабления в дожде γ_R выраженная в дБ/км и используемая в методах прогнозирования, имеет вид: $\gamma_R = kR^\alpha$, где коэффициенты k и α частотно зависимы [4]. Модель высоты слоя дождя h_R , также используемая в методах прогнозирования, для арктического региона задается простой формулой: $h_R = 5 - 0.075(\varphi - 23)$, где φ - широта местности в градусах, а h_R выражено в км [5]. Для арктических районов примем, что $h_R = 1.5$ км.

Рассмотрим пространственную модель зоны дождя. Если в окрестностях станции присутствует ячейка дождя, то с учетом того, что линия визирования следит за спутником в течение 16 мин (или меньше, если трасса связи не проходит через зенит), зону дождя можно считать неподвижной, а линия связи ее пересекает («разрезает»), так что на трассе возникают потери в дожде. Такой подход был применен ранее [6], где для упрощения расчетов ячейки дождя считаются круговыми цилиндрами однородного дождя с диаметром, зависящим от интенсивности: $D = 2.2(100/R)^{0.4}$. Для крайних значений интенсивности дождя в Таблице 3 диаметры ячеек составляют 15 км и 3.5 км соответственно. И хотя единичная ячейка дождя в природе далека от подобной модели, но метод расчета статистики ослабления, основанный на ней, дает результаты, близкие к экспериментальным [7].

Для наших расчетов воспользуемся следующей моделью. Примем, что спутник движется по зенитной орбите над наземной станцией. Центры цилиндрических зон дождя располагаются на земной проекции орбиты, причем в произвольной точке. При движении спутника, когда его углы места меняются от 10° до 90° и обратно, линия визирования будет пересекать зону дождя,

причем размеры зон пересечения также будут меняться. Нами были проведены расчеты этих размеров в зависимости от интенсивности дождя и, соответственно, от диаметров его зон. Полученные результаты, обозначенные как S , усреднялись по всем углам места и по всем положениям ячеек дождя для данной его интенсивности. Эти средние значения приведены в таблице 4. Там же указаны средние величины ослабления радиоволн A с частотой 30 ГГц на трассе.

Таблица 4

R , мм/ч	0.8	2	5	8	14	33
S , км	1.9	1.65	1.4	1.25	1.1	0.85
A , дБ	0.2	0.4	0.8	1.2	1.9	3.8

Из этой таблицы видно, что ослабление радиоволн в дождях в этом климате имеет небольшую величину, что связано с довольно малой интенсивностью дождя по сравнению со средними широтами. Согласно Таблице 3 дождь с интенсивностью 33 мм/ч в субарктических районах может быть в течение 52 мин в год, и, соответственно, столько же времени может быть ослабление в дождях величиной 3.8 дБ. Следует также учитывать, что наша модель расчета дает наибольшие значения длин секущих, поскольку в реальности орбита может не быть зенитной, а центры ячеек дождя могут быть смещены от проекции орбиты, что уменьшит длины пересечения и, соответственно, ослабление радиоволн.

Таким образом, применение ММВ для спутниковой связи в Арктике вполне допустимо с точки зрения ослабления радиоволн на трассе.

2. Определение параметров приёмно-передающего тракта спутниковой линии связи

Определим теперь значение отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника для следующих параметров: расстояния от КА до приёмной антенны $4.04 \cdot 10^6$ м, диаметры передающей и приемной антенн соответственно 3 и 0.5 м,

с коэффициентами использования поверхности и КПД соответственно 0.5 и 0.95, мощность передатчика 10 Вт. Мощность сигнала на входе приемника, при этих параметрах, в соответствие с основным уравнением радиосвязи [8] составит $1.192 \cdot 10^{-9}$ Вт.

Шумовая температура приемной системы состоит из шумов антенны и собственных шумов приемника;

Шумовая температура антенны включает в себя:

- атмосферный шум, который в рассматриваемом диапазоне, при угле места антенны 10° [9] (рис. 1), составит примерно 70 К;
- шум реликтового излучения, который составит примерно 3 К;
- Планковской поправки температуры (h/k), где h и k -соответственно постоянные Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) и Планка ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц),
- частота излучения (~ 30 ГГц), которая составит 1.435 К.

Таким образом:

- шумовая температура антенны составит примерно 74.5 К;
- температура собственных шумов неохлаждаемого (~ 300 К) приемника, с учетом потерь от переоблучения рупором зеркала антенны (~ 0.49 дБ), потерь в волноводах (~ 0.1 дБ) и коэффициента шума приемника 1.5 дБ, составит 185.67 К;
- общая шумовая температура приемной системы T_{sys} составит 260.17 К;
- мощность шума на входе приемника, при общей полосе сигнала в диапазоне 4 ГГц (30-34 ГГц) составит $1.436 \cdot 10^{-11}$ Вт;
- ОСШ на входе приемника составит 13.16 дБ. При этом приняты значения:
 - необходимый энергозапас 3 дБ;
 - максимальное затухание сигнала в тропосфере (1.27 дБ) при минимальном угле места 10° с учетом максимального зенитного затухания в тропосфере 0.22 дБ и максимального затухания в дожде 3.8 дБ.

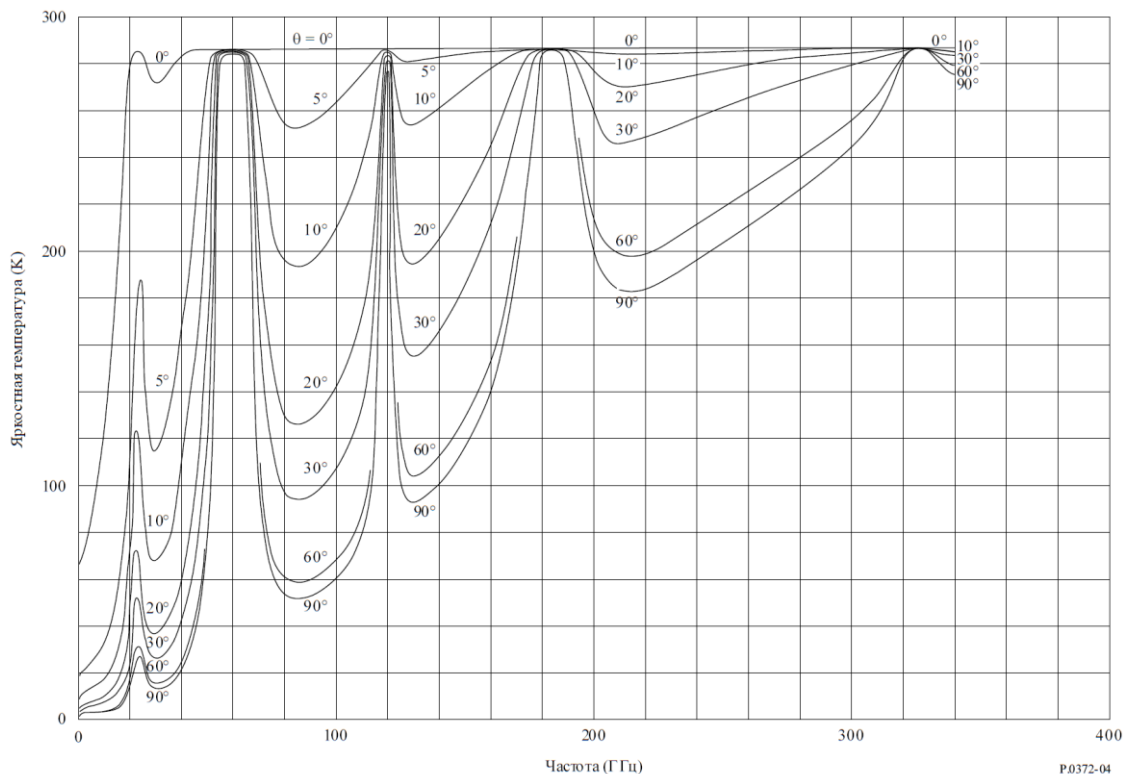


Рис. 1. Яркостная температура атмосферы (К) в зависимости от частоты при различных углах места антенн (θ).

Заключение

Исходя из вышеописанного, можно заключить, что применение ММВ в спутниковых линиях связи в условиях Арктики существенно увеличивает скорость передачи вследствие увеличения полосы частот канала, особенно в сравнении с линиями связи дециметрового и сантиметрового диапазонов радиоволн. Отметим следующие особенности использования радиоволн этого диапазона при организации спутниковых каналов связи:

1. угол места антенны нецелесообразно снижать менее 10° , поскольку в этом случае существенно возрастает путь радиосигнала в тропосфере, что увеличивает затухание сигнала;
2. формируемая система передачи представляется гибкой; например, возможно снижение скорости передачи с 8 Гбит/с до 4 Гбит/с, что является также очень высокой скоростью, но при этом ОСШ на входе приёмника увеличивается на 3 дБ. Возможно, не снижая общей скорости передачи,

незначительно уменьшить информационную скорость, например, с 8 Гбит/с до 7.7-7.65 Гбит/с, применив, тем самым, современный помехоустойчивый код, параметры которого можно дистанционно изменять при длительном процессе работы спутниковой группировки.

Литература

1. Средние месячные аэрологические данные на изобарических поверхностях. Станции СССР. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1987.
2. Рекомендация МСЭ-R P.676-3. Ослабление в атмосферных газах.
3. Рекомендация МСЭ-R PN.837-1. Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн.
4. Рекомендация МСЭ-R 838-3. Модель погонного ослабления в дожде.
5. Рекомендация МСЭ-R P.839-1. Модель высоты слоя дождя.
6. Пожидаев В.Н. Статистика ослабления радиоволн в дожде при реализации линии связи с низколетящим спутником // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. №12. С.1455-1458.
7. Пожидаев В.Н., В.В. Святогор В.В. Сравнение различных методов статистики ослабления радиоволн в дождях на трассах наземных и спутниковых линий. Обзор // Труды НИИР. 1989. №1. С.37.
8. Андрианов М.Н., Костенко В.И., Лихачев С.Ф.. О повышении спектральной эффективности и пропускной способности в канале передачи данных на линии космический аппарат – наземная станция слежения. // Космические исследования. 2018. Т. 56. №1. С. 85-92.
9. Рекомендация МСЭ-R P.372-13 (09/2016). Радиошум.

Для цитирования:

Андрианов М.Н., Корбаков Д.А., Пожидаев В.Н. Возможные спутниковые линии связи в условиях Арктики. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.13>