

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.2

ВОЗМОЖНАЯ РАБОТА СПУТНИКОВЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

© 2021 г. М. Н. Андрианов^а, Д. А. Корбаков^б, В. Н. Пожидаев^{б, *}

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Ленинский просп., 53, Москва, 119991 Российская Федерация

^бИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

ул. Моховая 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: vicnic@cplire.ru

Поступила в редакцию 30.09.2020 г.

После доработки 16.01.2021 г.

Принята к публикации 31.03.2021 г.

Рассмотрена возможность применения в условиях Арктики спутниковых линий связи миллиметрового (ММ) диапазона для обеспечения надежной и высокоскоростной связи. Основной проблемой для применения ММ-волн являются возможные метеорологические условия для распространения радиоволн в холодное время года. Вертикальные профили метеорологических данных для пары островов в Северном Ледовитом океане использовались для вычисления молекулярного поглощения на возможной линии связи. Предложена очень простая модель ослабления радиоволн в дождях на такой линии. Орбиты спутников для вычисления запаса линии на затухание предполагались как в существующей спутниковой системе “Гонец”, работающей на частотах 300/400 МГц. Результаты вычислений показывают, что спутниковая связь в ММ-диапазоне в Арктике возможна.

DOI: 10.31857/S0033849421080015

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. Эта работа является продолжением работы [1], где проводился расчет такой линии связи и была дана оценка возможности осуществления передачи информации по высокоскоростному каналу миллиметровых (ММ) волн в Арктических широтах. В этой работе проводятся дальнейшие оценки, посвященные влиянию турбулентности на пропускную способность линии связи в тех же условиях.

Повторим кратко некоторые оценки, проведенные в работе [1].

В качестве прототипа спутника (космического аппарата) (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 связь и передачу данных в

удаленных и труднодоступных районах, включая территории Крайнего Севера. Поэтому принимаем существующие параметры орбит движения аппаратов и исследуем применимость для связи гигагерцового (ММ-волн) диапазона волн в климатических условиях Арктики. Связь осуществляется по системе: наземный терминал—спутник—спутник—наземный терминал. Один из спутников всегда будет находиться в заданной точке для осуществления приема-передачи информации. В северных широтах время ожидания сеанса связи абонентом для системы из 12 КА составляет ноль минут, т.е. обмен данными с абонентом происходит в режиме реального времени. Применение ММ-диапазона позволит организовать высокоскоростной канал.

Для конкретных расчетов выберем два острова: о. Визе (79° с.ш.) и о. 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

Таблица 1. Характерные приземные значения средне-месячных параметров воздуха

Пункт	Месяц	P , мбар	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

Таблица 2. Значения зенитного поглощения (в дБ)

Пункт	Месяц	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

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 3480 км. При движении спутника эта дальность уменьшается до 1400 км, когда он в зените, и снова нарастает до 3480 км. При этом углы места увеличиваются от 10° до 90° , а затем также спадают.

Рассмотрим величины ослабления радиоволн на указанных спутниковых линиях связи в Арктике. Найдем молекулярное поглощение, которое будет присутствовать всегда, и ослабление в дождях в летнее время года. Другие метеоявления (облака, туманы) рассматривать не будем из-за малой вероятности их появления в данных метеоусловиях.

Зенитное поглощение для выбранных географических пунктов рассчитано для января и июля по опубликованным данным по высотным профилям метеоэлементов [2]. Характерные приземные значения среднемесячных параметров воздуха: давления P , температуры T и абсолютной влажности a для двух месяцев приведены в табл. 1.

Расчеты молекулярного поглощения на каждой из заданных высот были проведены по приближенной методике [3], после чего проводили интегрирование по высоте и были получены значения зенитного поглощения (табл. 2).

Для расчета поглощения радиоволн на наклонных трассах с углами места θ более 10° табличные значения надо разделить на $\sin\theta$. Для $\theta = 10^\circ$ величина $1/\sin\theta$ равна 5.67, т.е. это максимальное число, на которое могут быть умножены данные табл. 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 затухание также непрерывно меняются из-за движения спутника. Однако в 80-х годах XX в. проводились многочисленные эксперименты по изучению работоспособности спутниковых линий связи в гигагерцовом диапазоне при связи между наземным пунктом и искусственным спутником Земли на геостационарной орбите. Высота орбиты спутника при этом составляет 36000 км, что существенно больше характерных дальностей в нашем случае. Поскольку аппаратура для диапазона ММ-волн стабильно работала при таких дальностях, то и для наших задач (несмотря на меньшие размеры приемо-передающих антенн) ее работоспособность должна реализовываться. Наиболее предпочтительным для связи 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. Но этот расчет представляет собой непростою 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 материалах Международного союза электросвязи [4] земной шар условно разбит на несколько зон дождя, причем Арктике соответствует зона А. Ниже приведено среднее вероятностное распределение интенсивности дождя R для этой зоны:

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 [5]. 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 град, а h_R , в км [6]. Для арктических районов примем, что $h_R = 1.5$ км.

Обратимся теперь к пространственной модели 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 [7]. Там для упрощения расчетов ячейки дождя считаются круговыми цилиндрами однородного дождя с диаметром, зависящим от интенсивности: $D = 2.2(100/R)^{0.4}$. Для приведенных выше двух крайних значений интенсивности дождя, <0.1 и 33 мм/ч, диаметры ячеек составляют 15 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 [8].

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 любой 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 S , усреднились по всем углам места и по всем положениям ячеек дождя для данной его интенсивности. Эти средние значения приведены в табл. 3. Там же указаны средние величины ослабления радиоволн A с частотами 30 и 90 ГГц на трассе.

Данные, приведенные в табл. 3 для частоты 30 ГГц, несколько отличаются от данных в аналогичной таблице работы [1], поскольку расчеты были выполнены более корректно. Из табл. 3 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 табл. 3 общая длительность дождя с интенсивностью 33 мм/ч в субарктических районах 52 мин в год и, соответственно, столько же времени может быть ослабление в дождях величиной 4.7 дБ на частоте 30 ГГц. 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.

Таблица 3. Возможные величины ослабления в дождях радиоволн для двух частот при спутниковой связи в Арктике

R , мм/ч	S , км	A , дБ	
		30 ГГц	90 ГГц
0.8	1.9	0.2	0.8
2	1.65	0.5	2.9
5	1.4	1.2	5.0
8	1.25	1.6	6.3
14	1.1	2.6	8.5
33	0.85	4.7	12.3

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

Определим теперь значение отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника для следующих параметров; расстояния от КА до приемной антенны 3.48×10^6 м, диаметры передающей и приемной антенн соответственно 0.5 и 3 м, с коэффициентами использования поверхности и КПД 0.5 и 0.95 , мощность передатчика 10 Вт. Мощность сигнала на входе приемника при этих параметрах в соответствии с основным уравнением радиосвязи [8] составит 1.606×10^{-9} Вт.

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

Шумовая температура антенны включает:

- 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;
- планковскую поправку температуры ($h\nu/k$), где h и k – соответственно постоянные Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К) и Планка (6.626×10^{-34} Дж/Гц), а частота излучения ($\nu \sim 30$ ГГц), так что шумовая температура составит 1.44 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 $T_{\text{сис}}$ составит 260.17 К;

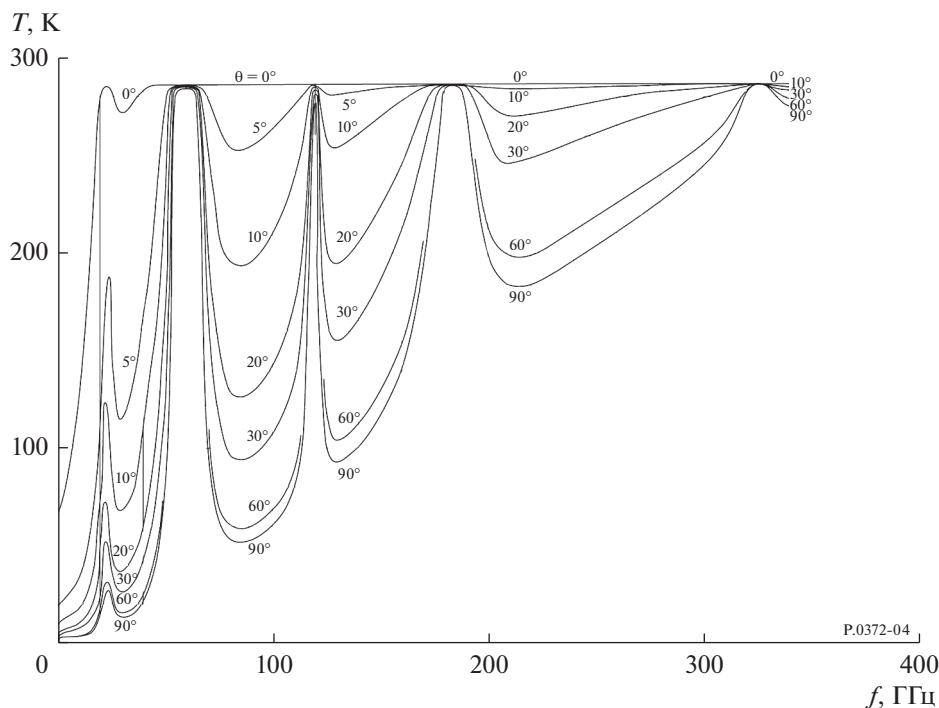


Рис. 1. Яркостная температура атмосферы (T) в зависимости от частоты при различных углах места антенн (цифры на кривых).

— мощность шума на входе приемника при общей полосе сигнала в диапазоне 4 ГГц (30...34 ГГц) составит 1.436×10^{-11} Вт;

— ОСШ на входе приемника составит 14.86 дБ.

При этом приняты следующие значения: 1) необходимый энергозапас 3 дБ; 2) 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 4.7 дБ (на несущей частоте 30 ГГц).

Исходя из описанного выше, можно сделать вывод, что применение ММ-волн в спутниковых линиях связи в условиях Арктики вполне возможно. Их применение существенно увеличивает скорость передачи вследствие увеличения полосы частот канала, особенно в сравнении с линиями связи дециметрового и сантиметрового диапазонов радиоволн.

Однако флуктуации амплитуды сигнала, возникающие вследствие турбулентности атмосферы, снижают помехоустойчивость канала связи и скорость передачи данных по нему. Атмосферная турбулентность характеризуется величиной C_ϵ^2 , где C_ϵ — структурная постоянная (структурная функция диэлектрической проницаемости воздуха). К сожалению, мы не нашли данных о величинах структурной постоянной в Арктике. Но судя по экспериментальным данным работы [11], изме-

ренные значения структурной постоянной составляли для середины января при -8.6°C величину $0.091 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$, для середины мая при $+17.6^\circ\text{C}$ величину $0.28 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$, а в летний период величину $0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$. Поэтому можно сделать вывод, что турбулентность воздуха для условий Арктики будет существенно меньше, чем в средней полосе, что должно повысить достоверность передачи данных по спутниковому каналу связи.

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. Дальнейшего анализа заслуживает энергетика исследуемых линий связи при уточнении возможных траекторий движения спутников.

3. Флуктуации диэлектрической проницаемости воздуха, приводящие к флуктуациям амплитуды радиосигналов, должны быть меньше для условий Арктики, чем в средней полосе России.

4. Формируемая система передачи представляется гибкой; например, возможно снижение скорости передачи с 8 до 4 Гбит/с, что является также очень высокой скоростью, но при этом ОСШ на входе приемника увеличивается на 3 дБ. Возмож-

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов М.Н., Корбаков Д.А., Пожидаев В.Н. // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug20/13/text.pdf>.
2. Рекомендация МСЭ-R P.676-3. Ослабление в атмосферных газах. М.: Междунар. союз электросвязи, 2005.
3. Рекомендация МСЭ-R PN.837-1. Характеристики осадков, используемые при моделировании пространства радиоволн. М.: Междунар. союз электросвязи, 1994.
4. Рекомендация МСЭ-R 838. Модель погонного ослабления в дожде. М.: Междунар. союз электросвязи, 2005
5. Рек. МСЭ-R P.839-1. Модель высоты слоя дождя. М.: Междунар. союз электросвязи, 2005
6. Пожидаев В.Н. // РЭ. 2005. Т. 50. № 12. С. 1455.
7. Пожидаев В.Н., Святогор В.В. // Труды НИИР. 1989. № 1. С. 37.
8. Андрианов М.Н., Костенко В.И., Лихачев С.Ф. // Космич. исслед. 2018. Т. 56. № 1. С. 85.
9. Рекомендация МСЭ-R. P.372-13. Радишум. М.: Междунар. союз электросвязи, 2013.
10. Загорин Г.К., Зражевский А.Ю., Коньков Е.В. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2001. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/9/text.html>.