

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.396

СИГНАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
ДЛЯ КОМАНДНО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛИНИИ СВЯЗИ  
СО СПУСКАЕМЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

© 2022 г. М. В. Терешонок<sup>a, b, \*</sup>, Н. В. Кленов<sup>a, c</sup>, Е. М. Лобов<sup>a</sup>,  
Д. Н. Шубин<sup>a</sup>, Н. А. Кандауров<sup>a</sup>, В. И. Липаткин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Московский технический университет связи и информатики,  
ул. Авиамоторная, 8а, Москва, 111024 Российская Федерация

<sup>b</sup>МИРЭА – Российский технологический университет,  
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация

<sup>c</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Российская Федерация

\*E-mail: m.v.tereshonok@mtuci.ru

Поступила в редакцию 02.08.2021 г.

После доработки 26.08.2021 г.

Принята к публикации 15.09.2021 г.

Предложены сигнальные конструкции для модема, учитывающие особенности перспективного метода преодоления плазменной радиоблокировки при входе спускаемого космического аппарата в атмосферу. Получены оценки для дальности связи с учетом потерь в атмосфере и в плазменном слое при использовании согласованного с параметрами плазмы резонатора.

DOI: 10.31857/S0033849422030160

## ВВЕДЕНИЕ

После первых космических запусков возникла проблема радиоблокировки, проявляющаяся в потере радиосвязи со спускаемыми космическими аппаратами (СКА) при их входе в атмосферу на большой скорости [1]. Причиной является возникновение слоя плазмы вокруг СКА из-за ударной волны, вызванной его быстрым движением в атмосфере [2, 3]. Возникающая вокруг СКА плазменная оболочка (ПО) характеризуется так называемой плазменной частотой, зависящей от концентрации электронов в плазме и составляющей 3...5 ГГц. Электромагнитные волны с меньшими несущими частотами полностью отражаются от такой ПО.

Проблема преодоления радиоблокировки рассмотрена в целом ряде работ [4–6], предложены различные пути ее решения [7–12]. Наиболее перспективным и технологичным представляется использование диэлектрического покрытия на поверхности антенны с заданной толщиной и диэлектрической проницаемостью, образующего резонатор для эффективного прохождения радиосигналов с выбранными для связи частотами [12, 13]. В настоящее время разработана теория преодоления плазменной радиоблокировки в условиях неста-

ционарности плазмы с использованием такого резонатора [14].

В работе [14] промоделирован резонатор и оценены его важнейшие свойства, включающие импульсную характеристику и коэффициент прохождения сигнала через плазму. Получена оценка полосы частот, эффективно проходящих через плазменный слой за счет резонансного туннелирования (эта полоса составляет порядка 14 МГц). Показано, что энергетические потери при наличии плазменной оболочки и использовании резонатора могут составить всего 1 дБ по сравнению с полным отсутствием плазменной оболочки. В то же время в литературе не приведены предложения по разработке сигнальных конструкций, совместимых с особенностями резонатора и предлагающих разумный компромисс между скоростью, помехоустойчивостью и дальностью связи, что обуславливает актуальность данной работы.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача настоящего исследования состоит в выборе сигнальных конструкций, обеспечивающих приемлемую для предметной области дальность, скорость и помехоустойчивость связи.

В настоящее время в каналах управления околоземными космическими аппаратами использу-

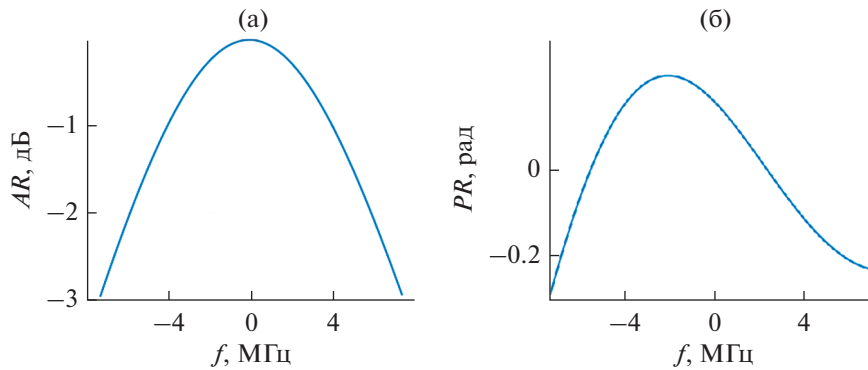


Рис. 1. АЧХ системы “плазма и резонатор” на центральной частоте 2.632 ГГц в полосе 14.8 МГц (а) и нелинейная составляющая ФЧХ системы “плазма и резонатор” на центральной частоте 2.65 ГГц в полосе 14.8 МГц (б).

ются сигналы с расширенным спектром и применением помехоустойчивого кодирования на основе каскадного кода, включающего код Рида–Соломона снаружи и сверточный код внутри [15]. В телеметрическом канале китайской космической станции Тяньхэ, например, длина псевдослучайных последовательностей, используемых для расширения спектра сигналов, составляет 1023 бита, а ширина спектра порядка 6 МГц. Для связи с космическими аппаратами, исследующими глубокий космос, используются турбокоды и LDPC-коды, обладающие повышенной помехоустойчивостью по сравнению с классическим сверточным кодом и кодом Рида–Соломона. Командно-телеметрические радиолнии беспилотных летательных аппаратов также используют сигналы с расширенным спектром с длиной псевдослучайной последовательности до 8192 бит [16]. Использование сигналов с расширенным спектром, а также современных методов помехоустойчивого кодирования с применением итеративных методов декодирования и недвоичных кодов позволит обеспечить высокую надежность передачи команд по командно-телеметрической радиолнии и обеспечить устойчивость линии к воздействию внешних помех естественного и искусственного происхождения.

Резонатор, предложенный в [14], позволяет использовать ширину полосы сигнала 1.8 МГц, что вкупе с требуемыми скоростями передачи телеметрической информации диктует ограничения на применяемые сигнальные конструкции.

## 2. ПРИЕМ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ “ПЛАЗМА И РЕЗОНАТОР”

Оптимальный по отношению мощностей сигнала и помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума (ОСШ)  $P_c/P_{ш}$  прием сигналов осуществляется с использованием согласованной фильтрации [17]. Частотная характеристика согласованного фильтра зависит от спектра сигнала

и формы спектральной плотности мощности шумов. Проходя через плазменный слой и резонатор, радиосигнал искажается (в том числе за счет разного поглощения и отражения энергии сигнала в разных частотных диапазонах), что необходимо учитывать при разработке согласованного фильтра. Характерные времена изменения искажений, вызванных флуктуациями концентрации электронов в плазменном слое, превышают длительность передачи кадров радиограммы, поэтому за время передачи кадра можно считать частотную характеристику системы “плазма и резонатор” постоянной [14] и согласовать фильтр с ней. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы “плазма и резонатор” в рабочей полосе имеет неравномерности и провалы (рис. 1а), а ее фазо-частотная характеристика (ФЧХ) имеет нелинейные участки (рис. 2б), которые следует учитывать при реализации согласованного приема.

Даже при согласовании приемного фильтра с подобной структурой за счет неравномерности ее частотной характеристики будут наблюдаться энергетические потери [18]. В соответствии с [18] потери  $L$  в ОСШ в худшем случае зависят от неравномерности  $\Delta$  следующим образом:  $L = (1 - \Delta^2)$ . Для АЧХ системы “плазма и резонатор”  $\Delta = 2.8$  дБ в полосе 14.8 МГц; тогда потери по сравнению с согласованным приемом в случае идеальной прямоугольной частотной характеристики составят  $L = 0.7$  дБ.

Если сравнить прием при наличии плазменного слоя с учетом согласования обработки с характеристиками слоя и без учета указанного согласования, то потери из-за отсутствия согласования составят дополнительные 0.37 дБ в полосе 14.8 МГц.

Таким образом, учет характеристик системы “плазма и резонатор” при построении алгоритма обработки позволяет перейти к оптимальному приему и повысить отношение мощностей сигнала и помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума на 0.37 дБ.

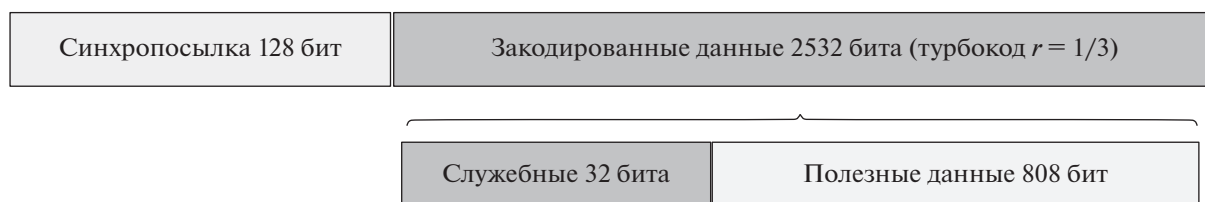


Рис. 2. Структура кадра радиogramмы.

### 3. СИГНАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В ходе исследования была выбрана структура кадра радиogramмы, изображенная на рис. 2.

Блок данных объемом 840 бит, из которых 32 бита служебные, кодируется сверточным турбокодом [19] с относительной кодовой скоростью  $r = 1/3$ .

Схема используемого кодера приведена на рис. 3. Турбокодер представляет собой парал-

лельное соединение двух рекурсивных систематических сверточных кодеров. Скорость каждого кодера  $1/2$ . На вход первого кодера подается последовательность бит, а на вход второго – та же последовательность, перемеженная по некоторому закону. Таким образом на каждый входной бит турбокодер формирует три бита на выходе: входным битом (кодер систематический), проверочным битом с верхнего сверточного кодера и проверочным битом с нижнего сверточного кодера. Кодовое ограничение каждого сверточного кодера равно 4, полиномы стандартные:  $15_8$  и  $11_8$ . Алгоритм перемежения заимствован из стандарта WCDMA. Предлагается использовать итерационный алгоритм декодирования по метрике “LOGMAP”. На рис. 3б приведена зависимость средней вероятности битовой ошибки на выходе декодера от аналогичной вероятности на входе декодера.

В итоге, с учетом оставшихся бит в регистрах сдвига кодера получается 2532 закодированных бит. К ним вперед добавляются 128 бит синхросылки. Общий объем данных 2660 бит подвергается прямому расширению спектра с использованием гибридных псевдослучайных последовательностей (ПСП) на основе кодов де Брейна [20, 21] и кодов Голда [22]. Длина расширяющей спектр ПСП составляет 1024 символа. Использование ПСП де Брейна позволяет снизить вероятность радиоперехвата командной радиопередачи за счет большого объема ансамбля ПСП [22]. Для гибридных ПСП длины 1024 размер ансамбля последовательностей с достаточно низким уровнем взаимно-корреляционных функций составит  $2.3 \times 10^{77} \times 0.0001 = 2.3 \times 10^{73}$ , что обеспечит такое же количество кадров радиogramм. При учете выбранной длительности кадра и скорости передачи время возможной связи с использованием ансамбля гибридных ПСП составит  $2.6 \times 10^{65}$  лет непрерывной передачи информации.

Сигнал с расширенным спектром передается в эфир с использованием двоичной фазовой манипуляции ФМн-2. Скорость передачи чипов (символов сигнала с расширенным спектром) составляет 7.4 Мбод (полоса 14.8 МГц). Скорость передачи информации составляет  $808 / (2660 \times 1024 / 7400000) \approx 2.2$  кбит/с.

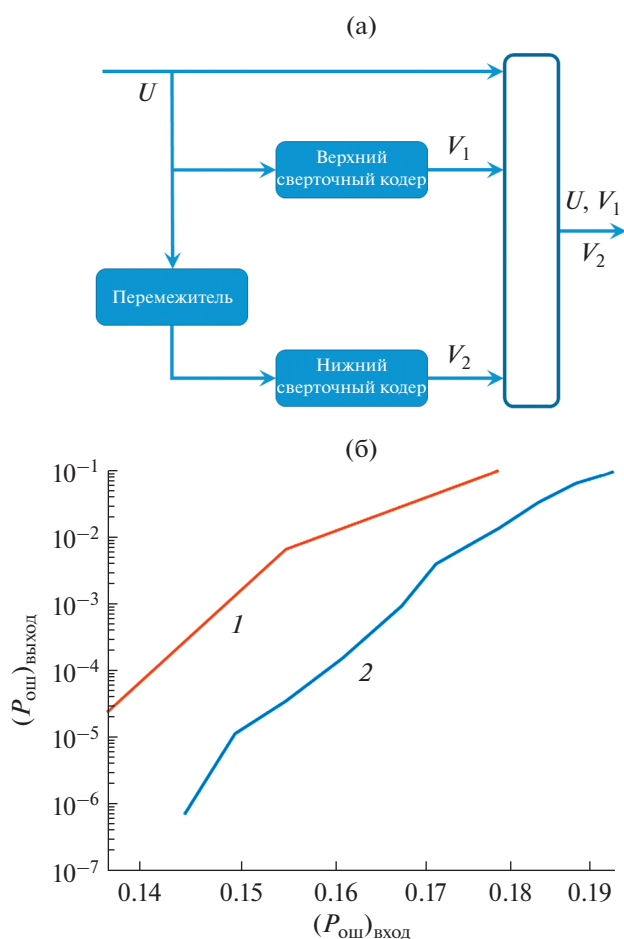


Рис. 3. Структурная схема кодера сверточных турбокодов (а) и вероятностная характеристика используемого турбокода (б): 1 – PSK-2, турбокод; 2 – DPSK-2, некогерентный турбокод;  $(P_{\text{ош}})_{\text{вход}}$  и  $(P_{\text{ош}})_{\text{выход}}$  – вероятность ошибки на бит на входе и выходе декодера.

**Таблица 1.** Основные параметры используемой сигнальной конструкции

Тип модуляции	ФМн-2, прямое расширение спектра
Длина расширяющей спектр ПСП	1024
Код, исправляющий ошибки	Сверточный турбокод, $r = 1/3$
Ширина полосы, МГц	14.8
Размер кадра, бит	2660
Размер полезных данных, бит	808
Длительность передачи кадра, с	0.36
Чиповая скорость, Мбод	7.4
Скорость передачи данных, кбит/с	2.2

Основные параметры сигнальной конструкции приведены в табл. 1.

На базе разработанной имитационной модели радиолинии было проведено исследование помехоустойчивости предложенного варианта сигнальных конструкций. Кривая помехоустойчивости приема предлагаемых сигнальных конструкций приведена на рис. 4 (вероятность ошибки на 1 бит в зависимости от отношения мощностей сигнала и помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума). Из графика видно, что средняя вероятность ошибки на 1 бит на уровне  $1.0 \times 10^{-4}$  достигается при отношении мощностей сигнала и помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума порядка  $-32$  дБ в полосе приема 14.8 МГц для скорости передачи данных 2.2 кбит/с.

#### 4. ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В АТМОСФЕРЕ

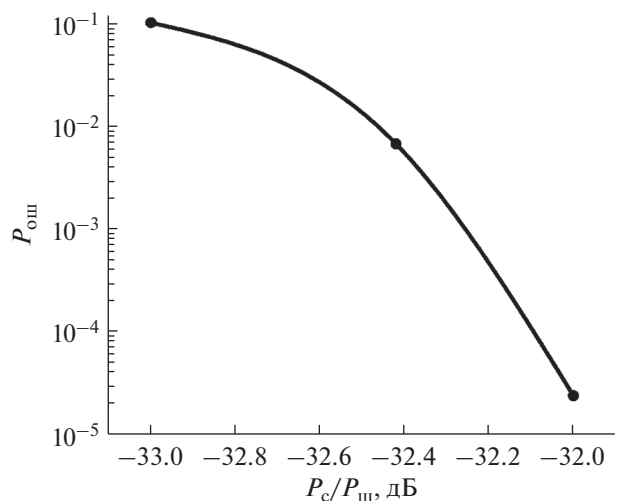
Оценка потенциальной максимальной дальности связи с СКА была проведена с учетом требований к уровню отношения мощностей сигнала и помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума на входе демодулятора. Среднее отношение мощностей сигнала и помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума на входе демодулятора в полосе приема  $P_c/P_{ш}$  может быть вычислено по формуле

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = \frac{P_{РПДУ} G_{РПДУ} G_{РПРУ}}{((K_{ш} - 1) k_B T_{РПРУ} + K_{вн} k_B T_0 + k_B T_{атм}) \Delta f \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2},$$

где  $P_{РПДУ}$  – мощность, подводимая к антенне передатчика,  $G_{РПДУ}$  – коэффициент усиления антенны передатчика,  $G_{РПРУ}$  – коэффициент усиления антенны приемника,  $K_{ш}$  – коэффициент шума прием-

ника,  $K_{вн}$  – коэффициент внешнего шума от небесных тел,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T_{РПРУ}$  – температура активных каскадов приемника,  $T_0 = 290$  К,  $T_{атм}$  – эквивалентная температура шумов атмосферы,  $\Delta f$  – ширина полосы приема (совпадает с шириной спектра принимаемого сигнала),  $\lambda$  – длина волны, соответствующая несущей частоте принимаемого сигнала,  $r$  – дальность связи.

Оценка дальности связи  $r$  в зависимости от эквивалентной излучаемой мощности  $P_{РПДУ} G_{РПДУ}$  была проведена при условии, что требуемое отношение мощностей сигнала и шума  $P_c/P_{ш}$  в полосе приема определяется кривыми помехоустойчивости по уровню ошибки на бит  $10^{-4}$  ( $-32$  дБ в полосе 14.8 МГц). При расчете предполагались следующие значения:



**Рис. 4.** Вероятность ошибки на бит в зависимости от отношения мощностей сигнала и шума.

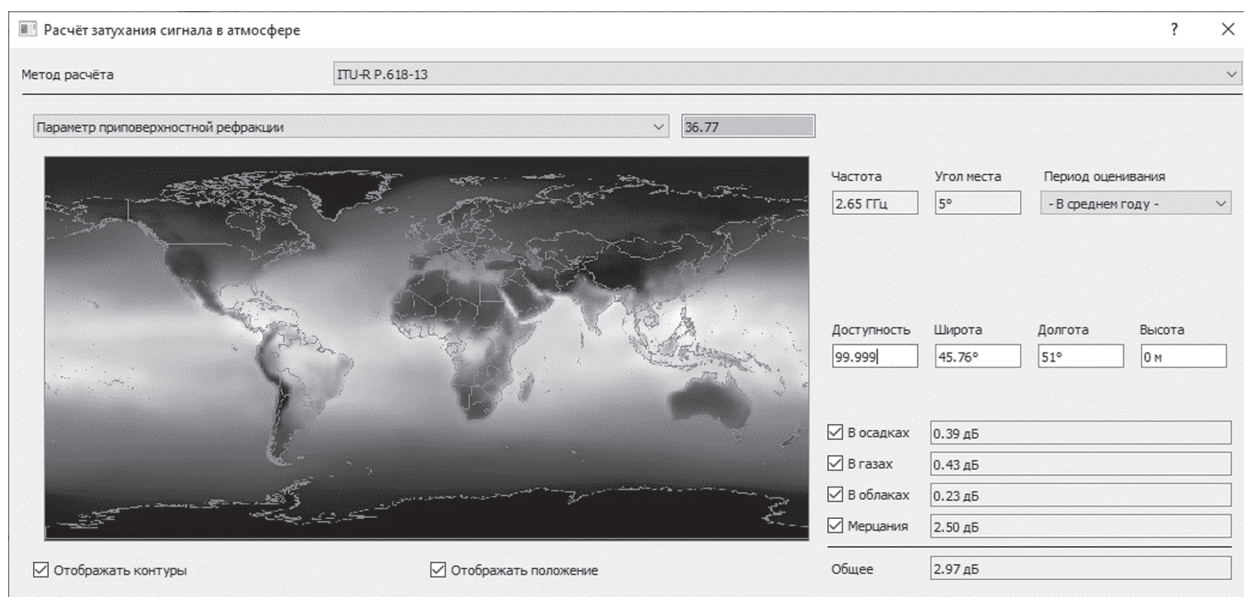


Рис. 5. Расчет затухания радиосигнала в атмосфере.

- центральная частота 2.632 ГГц;
- коэффициент усиления антенны приемника от 0 до –10 дБ, так как антенна выполняется с учетом первичных требований по массе и габаритам;
- коэффициент шума приемника 4 дБ;
- температура каскадов приемника максимальная 100°C;
- ширина полосы приема 14.8 МГц;
- требуемое отношение мощностей сигнала и шума в полосе приема –32 дБ.

Кроме потерь в свободном пространстве также были учтены потери при распространении сигнала в атмосфере с учетом влияния облаков и осадков по методике МСЭ-R P.618-13 [23] на рабочей частоте 2.632 ГГц.

На рис. 5 приведен результат оценки затухания сигнала по методике МСЭ-R P.618-13. Предполагалось, что связь со спускаемым космическим аппаратом осуществляется в районе Каспийского моря. Географическое положение в данном случае необходимо для учета различных статистических данных, касающихся осадков и облачности, накопленных МСЭ.

Из расчета видно, что общие потери в атмосфере на частоте 2.632 ГГц составляют величину порядка 3 дБ. Также в учет потерь был заложен запас в 3 дБ на различные негативные эффекты, включающие потери при неидеальной работе схем синхронизации и при компенсации эффекта Доплера по данным системы навигации.

На рис. 6а приведены расчетные кривые потенциальной максимальной дальности связи в зависимости от коэффициента усиления приемной

антенны и эквивалентной излучаемой мощности с учетом потерь на распространение в свободном пространстве, а также атмосферных потерь и неидеальности систем синхронизации и компенсации эффекта Доплера.

## 5. ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ВНЕШНЕГО ШУМА

В диапазоне 2630 МГц согласно рекомендации МСЭ-R P.372-14 [24], описывающей радишумы в диапазоне от 100 МГц до 100 ГГц, преобладают следующие виды шумов:

- галактический шум;
- шум крупных небесных тел (Солнце, Луна);
- шум за счет кислорода и паров воды;
- космический фон.

При этом максимальный уровень шума происходит от Солнца (при использовании узконаправленной антенны, нацеленной на него), ожидаемый уровень эквивалентной шумовой температуры будет составлять около 38000 К для спокойного Солнца.

В ночное время преобладает шум от кислорода и паров воды, составляющий около 70 К на частоте 2630 МГц [24], при направлении антенны вдоль земной поверхности и при отсутствии Луны. При наличии Луны на небосводе шумовая температура ее излучения составит от 140 К при новолунии до 280 К при полнолунии.

При направлении антенны ночью в зенит в диапазоне 2630 МГц будет преобладать шум космического фона (2.7 К), что и определяет минимальный уровень шума.

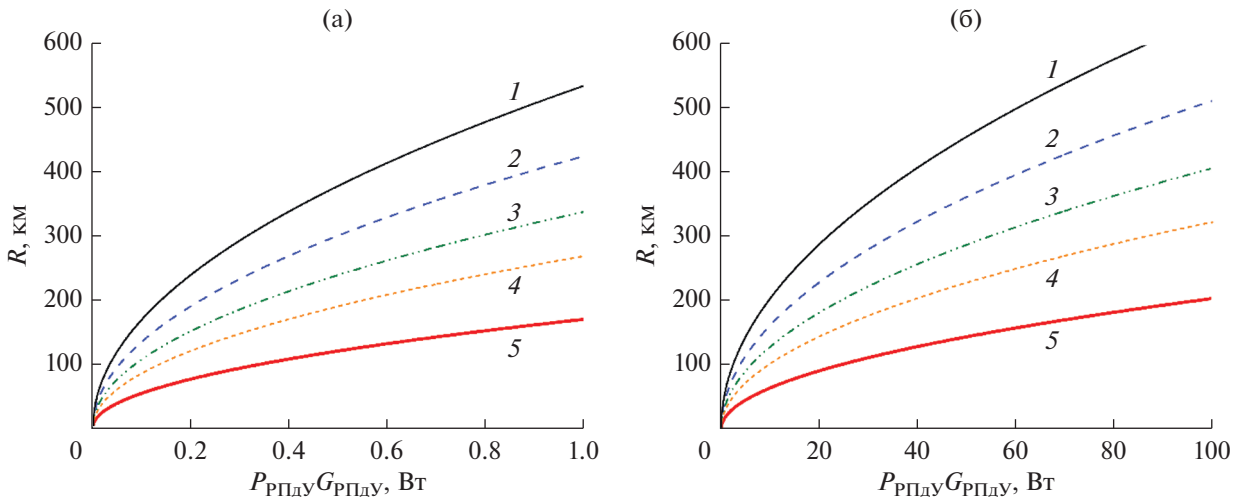


Рис. 6. Дальность радиосвязи с учетом потерь, ширина спектра 14.8 МГц (а) и дальность связи с учетом шума от Солнца и шумов от атмосферы (повышенная мощность) (б) при ( $G_{РПДУ}$ ) 0 (1), -2 (2), -4 дБ (3), -6 дБ (4) и -10 дБ (5).

Остальные виды шумов имеют гораздо меньший уровень [24] и могут не учитываться. Тогда коэффициент внешнего шума составит:

$K_{вн} = 21.17$  дБ, при  $T_{вн} = 38000$  К (максимальный шум от Солнца),

$K_{вн} = -0.15$  дБ, при  $T_{вн} = 280$  К (шум в ночное время при полнолунии),

$K_{вн} = -3.16$  дБ, при  $T_{вн} = 140$  К (шум в ночное время при новолунии),

$K_{вн} = -20.3$  дБ, при  $T_{вн} = 2.7$  К (шум в ночное время без Луны на небосводе, антенна направлена в зенит).

Наихудший случай реализуется при попадании Солнца в область главного лепестка диаграммы направленности антенны. При использовании антенн с достаточно широким главным лепестком диаграммы направленности влияние шума от Солнца существенно сокращает потенциальную дальность связи при той же эквивалентной мощности излучения – до 50 км. Для организации передачи данных в условиях шума от Солнца следует увеличить эквивалентную излучаемую мощность примерно в 100 раз, что может быть достигнуто либо повышением мощности передатчика, либо применением активной следающей направленной антенны на наземной станции, либо комбинацией обоих технических решений. Расчетные кривые потенциальной максимальной дальности связи при попадании Солнца в область главного лепестка диаграммы направленности антенны приведены на рис. 6б.

Из анализа характеристик дальности связи, представленных на рис. 6б, можно заключить, что предложенные сигнальные конструкции при использовании резонатора обеспечивают дальность связи со спускаемым космическим аппаратом бо-

лее 600 км при эффективной мощности передачи 100 Вт и учете шумов от Солнца и атмосферы в худшем случае (при попадании Солнца в область главного лепестка диаграммы направленности антенны).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложены сигнальные конструкции для модема, учитывающие особенности характеристик резонатора, обеспечивающего преодоление плазменной радиоблокировки при входе спускаемого космического аппарата в атмосферу. Получены характеристики дальности связи с учетом потерь в атмосфере и в плазменном слое при использовании резонатора. Предложенные сигнальные конструкции реализуют разумный компромисс между скоростью передачи информации и дальностью связи с учетом всех мешающих факторов и позволяют достичь полезной скорости 2 кбит/с при эффективной мощности передачи 100 Вт и учете шумов от Солнца и атмосферы на дальности в худшем случае (при попадании Солнца в область главного лепестка диаграммы направленности антенны) более 600 км. Ожидается, что предложенные сигнальные конструкции в купе с резонатором могут быть использованы для командно-телеметрической радиолинии связи со спускаемыми космическими аппаратами, не подверженной влиянию явления радиоблокировки.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-69-47013).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rybak J.P., Churchill R.J.* // IEEE Trans. 1971. V. AES-7. № 5. P. 879.
2. *Jones C.* // DTIC Document, 2006. Technical Report No. AFFTC-PA-08-08292.
3. *Shi L., Bai B.W., Liu Y.M., Li J.X.P.* // J. Electromagn. Waves Appl. 2013. V. 27. P. 518.
4. *Lei S., Lei Z., Bo Y., Xiaoping L.* // Plasma Sci. Technol. 2015. V. 17. P. 1006.
5. *Hu Y.L., Chen R.S.* // IEEE Trans. 2016. V. AP-64. № 3. P. 1984.
6. *He G., Zhan Y., Zhang J., Ge N.* // IEEE Trans. 2016. V. PS-44. № 4. P. 232.
7. *Xie K., Yang M., Bai B.* // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. № 2. P. 023301.
8. *Sha Y.X., Zhang H.L., Guo X.Y., Xia M.Y.* // IEEE Trans. 2019. V. AP-67. № 4. P. 2470.
9. *Qin L., Li C., Du Y., Li B.* // IEEE Trans. 2020. V. PS-48. № 6. P. 2075.
10. *Belov I.F., Borovoy V.Y., Gorelov V.A. et al.* // J. Spacecr. Rockets. 2001. V. 38. P. 249.
11. *Korotkevich A.O., Newell A.C., Zakharov V.E.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. № 8. P. 083305.
12. *Bogatskaya A.V., Klenov N.V., Tereshonok M.V. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. № 18. P. 185602.
13. *Bogatskaya A.V., Klenov N.V., Popov A.M., Tereshonok M.V.* // Tech. Phys. Lett. 2018. V. 44. № 8. P. 667.
14. *Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Klenov N.V. et al.* // IEEE Trans. 2020. V. AP-68. № 6. P. 4831.
15. TM Channel Coding Profiles. Recommended practice. CCSDS 131.4-M-1. Magenta Book, CCSDS Secretariat, 2011.
16. *Weilin J.* Civil UAV Monitoring Technique. ITU, SMWE 2018.
17. *Turin G.L.* // Proc. IEEE. 1976. V. 64. № 7. P. 1092.
18. *Sadr R., Hurd W.* // The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-88. 1987. P. 59.
19. *Назаров Л.Е., Головкин И.В.* // РЭ. 2010. № 55. № 10. С. 1193.
20. *Meltem Sönmez Turan* // Cryptography and Communications. 2012. V. 4. № 3-4. P. 233.
21. *Bruijn de N. G.* // Koninklijke Nederlandse Akademie v. Wetenschappen. 1946. V. 49. P. 758.
22. *Голубев Е.А., Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Шубин Д.Н.* // T-Comm. 2018. № 12(2). С. 76.
23. Рекомендация МСЭ-R. P. 372-14. 2019.
24. Рекомендация МСЭ-R. P. 618-13. 2017.