

Повышение эффективности канала связи в научных экспериментах дальнего космоса

© М. Н. Андрианов, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачёв

АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

Реферат

В работе рассмотрены зависимости мощности передатчика, необходимой для достижения требуемой вероятности ошибки передаваемых данных, от коэффициентов использования приемных антенн в условиях когерентного приема сигналов миллиметрового диапазона. В указанном диапазоне радиоволн, вследствие определенной вязкости воздуха и турбулентных тропосферных вихрей, сигналы подвержены логнормальным флуктуациям амплитуды. Кроме того, рассмотрены зависимости вероятности ошибок передачи данных от коэффициентов использования приемных антенн для простых сигналов и сигналов с защитой помехоустойчивым кодом в рассматриваемом канале связи.

Исследования были выполнены аналитическим методом в среде компьютерного моделирования MathCad при использовании основного уравнения радиосвязи, с учетом логнормальных флуктуаций амплитуды. Вероятности ошибок канала определялись как математические ожидания вероятности ошибок сигналов в гауссовом шуме по статистике логнормальных замираний. Вычисление выполнено для простых сигналов и сигналов, кодированных случайным помехоустойчивым кодом.

Полученные результаты позволяют, с одной стороны, определить необходимую мощность передатчика для достижения определенной вероятности ошибок в тропосферном канале, с другой стороны — оценить эффективность применения случайного помехоустойчивого кода в сравнении с некодированным сигналом для повышения помехоустойчивости и высокой скорости передачи данных в научных экспериментах дальнего космоса.

Ключевые слова: тропосферный канал, логнормальные амплитудные флуктуации, коэффициент использования поверхности, случайные коды.

Контакты для связи: Андрианов Михаил Николаевич (mihail-andrian@asc.rssi.ru).

Для цитирования: Андрианов М. Н., Костенко В. И., Лихачёв С. Ф. Повышение эффективности канала связи в научных экспериментах дальнего космоса // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 64. С. 3–8.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.3-8>

Improving Communication Efficiency in Deep Space Science Experiments

M. N. Andrianov, V. I. Kostenko, S. F. Likhachev

Astro Space Center Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The paper considers the transmitter power dependences necessary to achieve the required error probability of the transmitted data on the utilization factors of the receiving antennas surfaces under conditions of coherent reception of millimeter-wave signals. Signals in the specified range of radio waves, due to a certain viscosity of the air and turbulent tropospheric vortices, are subject to lognormal amplitude fluctuations. In addition, the dependences of the probability of data transmission errors on the utilization factors of the receiving antenna surface for simple signals and signals protected by an error-correcting code in the considered communication channel were considered.

The studies were performed by the analytical method in the MathCad computer simulation environment using the basic radio communication equation, taking into account lognormal amplitude fluctuations. The channel error probabilities were determined as mathematical expectations of signal error probability in Gaussian noise according to lognormal fading statistics. The calculation was performed for simple signals and signals encoded with a random error-correcting code.

The results obtained make it possible on the one hand to determine the required transmitter power to achieve a certain error probability in the tropospheric channel, and on the other hand to evaluate the effectiveness of using a random error-correcting code in comparison with an uncoded signal to increase noise immunity and high data transfer rate in deep space scientific experiments.

Keywords: tropospheric channel, lognormal amplitude fluctuations, surface utilization factor, random codes.

Contacts: Mikhail N. Andrianov (mihail-andrian@asc.rssi.ru).

For citation: Andrianov M. N., Kostenko V. I., Likhachev S. F. Improving communication efficiency in deep space science experiments // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 64. P. 3–8.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.3-8>

Введение

Передача данных в научных экспериментах дальнего космоса, как правило, осуществлялась до сих пор в сантиметровом или дециметровом диапазонах радиоволн. Наряду с некоторыми достоинствами этих диапазонов, таких как относительная простота, технологичность и доступность аппаратуры, достаточно высокая дифрагируемость радиоволн, позволяющая огибать различные препятствия, в том числе атмосферные флуктуации, они не лишены существенных недостатков. Во-первых, относительно низкая полоса частот для передачи данных не позволяет реализовать большую скорость передачи в канале связи, и, во-вторых, малый коэффициент усиления антенн в этих диапазонах снижает значение отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника, что является причиной возникновения дополнительных ошибок в приемнике и, как следствие, не способствует увеличению скорости передачи данных. Последние при этом ограничены в пределах от нескольких сотен Мбит/с до единиц Гбит/с.

Определенные требования научных и прикладных задач, реализуемых на аппаратах ближнего и дальнего космоса (планетная картография, динамический солнечный видеосерфинг, РСДБ Земля — Космос и Космос — Космос), вызывают необходимость существенного увеличения скорости записи данных на борту космического аппарата и их передачи на Землю. Для повышения скорости передачи данных были рассмотрены возможности применения различных методов, среди которых: спектрально эффективные методы модуляции и использование сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (Quadrature Amplitude Modulation — QAM) или ортогональных сигналов (Orthogonal Frequency Divide Modulation — OFDM). Применение спектрально эффективных методов модуляции резко снижают помехоустойчивость приема, в то время как манипуляции с последними двумя типами сигналов (QAM и OFDM) требуют использования линейных усилителей мощности бортовых передатчиков с низким КПД (12–15 %) (Андрянов и др., 2018). Это недопустимо в условиях энергодефицита при длительной автономной работе в условиях дальнего космоса. Использование сигналов оптического диапазона представляется затруднительным ввиду низкого соотношения энергий сигнала и планковского шума (Коржик и др., 1981; Хелстром, 1979).

Повышение эффективности канала связи в миллиметровом диапазоне радиоволн

Для существенного (по крайней мере кратно) повышения скорости передачи данных, в частности от космического сегмента интерферометра КА к наземной станции слежения (НСС) целесо-

образно реализовывать соответствующий канал в миллиметровом диапазоне радиоволн. Во-первых, здесь обеспечивается более высокое ОСШ на входе приемника вследствие возрастания усиления приемопередающих антенн на относительно малых длинах волн; во-вторых, коротковолновый миллиметровый диапазон более свободен для возможной передачи данных в существенно более широкой полосе частот относительно длинноволновых диапазонов. В соответствии с теоремой Шеннона — Хартли увеличение полосы частот для передачи данных обеспечивает линейный рост скорости передачи данных при неизменном ОСШ на входе приемника, в то время как при фиксированной полосе частот увеличение ОСШ может дать только логарифмический рост скорости (Андрянов и др., 2018).

Экспериментальные данные хорошо подтверждают вывод о нормальном распределении случайной величины χ в тех случаях, когда применимо (Рытов и др., 1978) первое приближение метода плавных возмущений:

$$C_{\varepsilon}^2 k^{1/3} l \ll 1, \quad (1)$$

где C_{ε} — структурная постоянная диэлектрической проницаемости; k — волновое число $2\pi/\lambda$, λ — длина волны; l — длина пути электромагнитной волны по каналу с логнормальными флуктуациями (по тропосферному каналу), $A(t)$ и A_0 — соответственно мгновенная амплитуда волны и амплитуда волны в невозмущенной среде. При $C_{\varepsilon} = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2/3}$; $\lambda = 0.00375 \text{ м}$; $l < 400 \cdot 10^3 \text{ м}$ указанное неравенство соблюдается. Поскольку логарифм амплитуды, как и уровень χ , распределен по нормальному закону, то сама амплитуда $A(t)$ и нормированная амплитуда $X(t) = A(t) / A_0$ имеют логарифмически нормальное распределение.

Перенос несущей сигнала в область миллиметрового диапазона радиоволн обеспечивает возможности реализации широкополосного сигнала. Например, Е-диапазон предполагает доступность полосы шириной до 10 ГГц (5 ГГц + 5 ГГц на участках 71–76 ГГц и 81–86 ГГц) (рис. 1). Предусмотрена упрощенная процедура выделения полос указанного диапазона. Применение четырехкратной фазовой модуляции ФМ-4 (QPSK — Quadrature Phase Shift Key) позволяет применить нелинейный усилитель мощности с высоким КПД (до 75 %), и удвоенная спектральная эффективность модуляции QPSK (2 бит/с/Гц) допускает реализацию в Е-диапазоне скорость передачи данных до 20 Гбит/с (без учета помехоустойчивого кодирования).

Следует иметь в виду, что использование мм-диапазона волн приводит к возрастанию дисперсии логнормальных флуктуаций амплитуды сигналов при прохождении через тропосферу. При

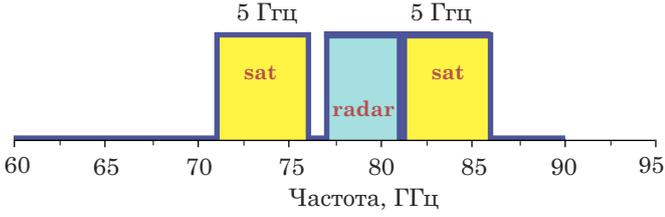


Рис. 1. E-диапазон 70–80 ГГц (суммарная полоса 10 ГГц)

передаче научных данных в экспериментах дальнего космоса со значительных расстояний длина пути и величина дисперсии зависят также и от угла места приемной антенны ([Андреанов и др., 2018](#)). В этом случае радиус первой зоны Френеля будет существенно превышать внешний масштаб турбулентности (L_0) размером около 10 м ([Рытов и др., 1978](#); [Татарский, 1967](#)), а дисперсия флуктуаций ([Андреанов и др., 2019](#); [Andrianov et al., 2022](#)) составит

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{16} \cdot C_\epsilon^2 \cdot L_0^{5/3} \cdot k^2 \cdot l \quad (2)$$

где l — длина пути электромагнитной волны в канале с логнормальными флуктуациями (тропосферном канале).

В соответствии с основным уравнением радиосвязи (3) мощность сигнала на входе приемника P_{rec} определяется в виде следующего выражения:

$$P_{rec} = P_{tr} \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_{tr}^2 \cdot D_{rec}^2}{16 \cdot \lambda^2 \cdot d^2} \cdot k_{tr} \cdot k_{rec} \cdot \eta^2 \quad (3)$$

где P_{tr} — мощность передатчика, D_{tr} , D_{rec} — диаметры соответственно передающей и приемной антенн, k_{tr} , k_{rec} — коэффициенты использования поверхностей (КИП) соответственно для передающей и приемной антенн, η — КПД антенн (принято значение 0.95), d — расстояние от КА до земной станции (ЗС), λ — длина волны (0.00375 м).

Преобразуя аналитическое выражение основного уравнения радиосвязи (3), можно определить мощность сигнала на выходе передатчика, при которой достигается необходимая мощность сигнала на входе приемника:

$$P_{tr} = P_{rec} \cdot \frac{16 \cdot \lambda^2 \cdot d^2}{\pi^2 \cdot D_{tr}^2 \cdot D_{rec}^2 \cdot k_{tr} \cdot k_{rec} \cdot \eta^2} \quad (4)$$

В свою очередь, мощность сигнала на входе приемника можно оценить через мощность шума P_{noise} приемника и ОСШ на входе приемника:

$$P_{rec} = ОСШ \cdot P_{noise} \quad (5)$$

Таким образом, мощность шума приемника определяется шумовой температурой приемной системы, а она, в свою очередь, включает шумы антенны и собственные шумы приемника.

Шумовая температура антенны зависит от:

— атмосферного шума, который в E-диапазоне при угле места антенны 30° ([Рекомендация МСЭ-R P.372-13](#)) составляет примерно 100 К;

— шума реликтового излучения, составляющего ~ 3 К;

— планковской поправки температуры ($h\nu/k$) для шумовой температуры, составляющей ~ 4 К; где k и h — соответственно постоянные Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) и Планка ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц), ν — частота излучения (~ 80 ГГц), длина волны $\lambda = 3.75$ мм.

Тогда шумовая температура антенны в целом составит 107 К.

Температура собственных шумов неохлаждаемого приемника (~ 300 К) с учетом потерь от просачивания в рупор шумов вне раскрыва зеркала антенны (~ 0.49 дБ), потерь в волноводах (~ 0.1 дБ) и коэффициента шума приемника (0.6 дБ) ([Sabir, Majeed, 2015](#)) составляет 95 К. Этот результат получен численным расчетом и требует экспериментального подтверждения.

Таким образом, общая шумовая температура приемной системы (T_{sys}) составит 202 К ($107 + 95$).

Мощность шума на входе приемника при полосе сигнала в E-диапазоне 10 ГГц (2×5 ГГц включая сегменты 71–76 ГГц и 81–86 ГГц) составит $2.78 \cdot 10^{-11}$ Вт.

Тогда мощность сигнала на выходе передатчика, при которой достигается необходимая мощность сигнала на входе приемника, окончательно определяется выражением

$$P_{tr} = P_{noise} \cdot 10^{(10.6+2.2 \cdot 0.85+3)/10} \cdot \frac{16 \cdot \lambda^2 \cdot d^2}{\pi^2 \cdot D_{tr}^2 \cdot D_{rec}^2 \cdot k_{tr} \cdot k_{rec} \cdot \eta^2} \quad (6)$$

В показателе степени аналитического выражения (6): 10.6 дБ — необходимое значение ОСШ на входе приемника, при котором вероятность ошибки когерентно принятого из тропосферного канала фазоманипулированного (QPSK) сигнала составит 10^{-3} ; значение $2.2 \cdot 0.85$ дБ отражает учет затухания при распространении сигнала в тропосфере ([Рекомендация МСЭ-R, P. 676-10](#)); 3 дБ — величина энергозапаса линии связи.

Отметим, что зенитное затухание в тропосфере толщиной 10 км ([Рекомендация МСЭ-R, P. 676-10](#)) составит 0.85 дБ. При расчете мощности сигнала на выходе передатчика длина тропосферного канала была принята равной 22 км при угле места приемной антенны 30° ([Андреанов и др., 2018](#)).

Таблица 1

		P_{tr} , Ватт, для обеспечения $P_e = 10^{-3}$		
		Диаметры приемных антенн (D_{rec})		
k_{rec}	σ_s , МКМ	$D = 13.2$ м	$D = 15$ м	$D = 21$ м
0.391	250	409	317	162
0.411	240	389	302	154
0.450	220	356	275	140
0.488	200	327	253	129
0.526	180	304	235	120
0.58	150	275	213	109
0.597	140	268	207	106
0.628	120	254	197	100
0.656	100	243	189	96

В таблице σ_s — СКО поверхности антенны

На рис. 2 представлены зависимости мощности передатчика (6) от КИП приемной антенны (k_{rec}) для получения вероятности ошибки (P_e) не более 10^{-3} . Здесь расстояние от передающей антенны до приемной (d) составляет 1.5 млн км; диаметр передающей антенны 2 м; КИП передающей антенны 0.5; λ составляет 0.00375 м, диаметры приемных антенн — 13.2; 15 и 21 м. Советующие значения мощности (6) приведены в табл. 1.

Для повышения помехоустойчивости (снижения вероятности ошибок) целесообразно применение современных высокоскоростных помехоустойчивых кодов. Например, случайный код класса LDPC (Low Density Parity Check), евклидово-гео-

метрический низкоплотный код (EG-LDPC) (Kou et al., 2001) с проверкой на четность размерности (1023, 781) с итеративным SPA (Sum Product Algorithm, Алгоритм суммы продукта) декодированием. Случайные коды относятся к классу помехоустойчивых кодов с «хорошим» кодовым расстоянием (Moon, 2005; Варагузин, 2005). Кодовое расстояние у этого типа кодов возрастает таким образом, что его отношение к длине кода при неограниченном возрастании последнего стремится к определенной положительной ненулевой константе (Moon, 2005). В предельном случае случайный код может полностью исправлять возникающие ошибочные данные.

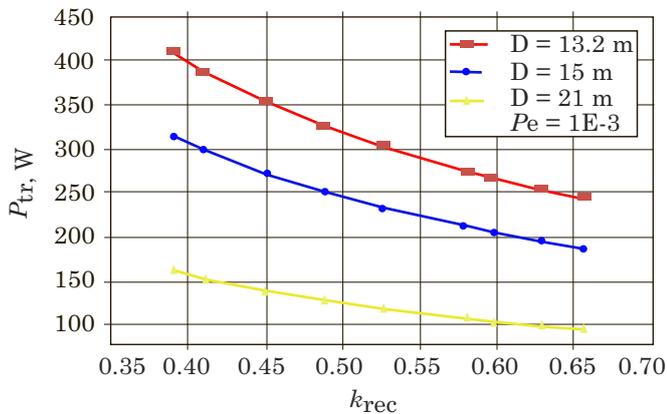


Рис. 2. Мощность передатчика (P_{tr}) при вероятности ошибок не более 10^{-3} , различных диаметрах антенн и коэффициентах использования поверхности антенн k_{rec} . Диаметр передающей антенны $D_{tr} = 2$ м; канал связи 1.5 млн км (сигнал некодирован)

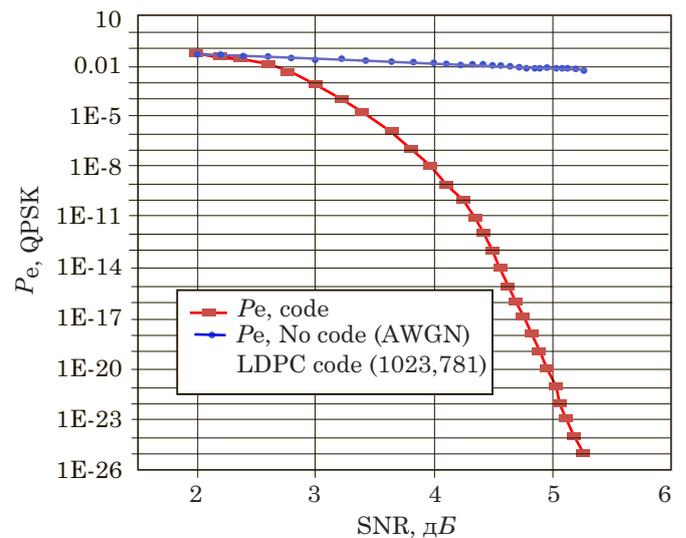


Рис. 3. Сравнение вероятностей ошибок исправляющего кода LDPC (1023, 781) и некодированного сигнала ФМ-4 (QPSK) с когерентным приемом в гауссовом шуме

На рис. 3 показан пример зависимости вероятности ошибок от SNR для исправляющего кода LDPC (1023, 781) (красная кривая) в сравнении с вероятностью ошибки некодированного сигнала ФМ-4 (QPSK) при когерентном приеме в гауссовом шуме.

Усредненная вероятность ошибки когерентного приема сигнала с модуляцией QPSK в гауссовом шуме (Окунев, 1991), получаем:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha \gamma} \cdot \quad (7)$$

по статистике логнормальных замираний (Андрианов и др., 2019):

$$p(\gamma) = \frac{1}{2\gamma\sqrt{2\pi\sigma_\gamma^2}} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0} + \sigma_\gamma^2} \right)^2}{2\sigma_\gamma^2} \right], \quad (8)$$

далее получаем вероятность ошибки на выходе когерентного демодулятора QPSK для сигнала из тропосферного канала с учетом логнормальных амплитудных флуктуаций:

$$P_e = \frac{1}{4} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\gamma\sqrt{2\pi\sigma_\gamma^2}} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0} + \sigma_\gamma^2} \right)^2}{2\sigma_\gamma^2} \right] \cdot \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha \gamma} d\gamma \cdot \quad (9)$$

В формулах (7–9) γ и γ_0 — соответственно мгновенное и среднее значение ОСШ на входе

приемного устройства, $\alpha = 1$ для фазоманипулированных сигналов.

С учетом (5–6) вероятность ошибки на выходе когерентного демодулятора QPSK можно представить в виде зависимости от КИП (k_{rec}) приемной антенны различных диаметров.

Для сравнения на рис. 4 представлены зависимости вероятности ошибки приема сигнала от КИП (k_{rec}) приемной антенны диаметром (D_{rec}) 13.2 м для кодированного и некодированного сигналов (1023, 781).

Соответствующие зависимости вероятности ошибок (9) для кодированных и некодированных сигналов приведены в табл. 2.

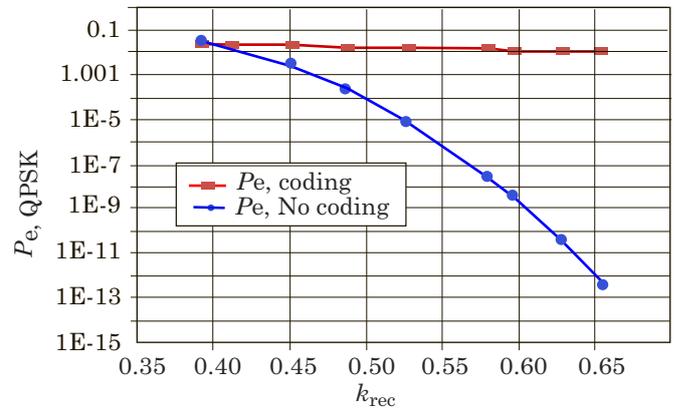


Рис. 4. Вероятность ошибок (P_e) в зависимости от k_{rec} для антенны $D_{rec} = 13.2$ м при мощности передатчика $P_{tr} = 100$ Вт. Квадратами обозначена вероятность ошибки для некодированного сигнала, кружками — для кодированного. Диаметр передающей антенны $D_{tr} = 2$ м; протяженность канала связи 1.5 млн км

Таблица 2

		P _e _non_Code; P _e _Code (1023, 781), при P _{tr} = 100 Ватт	
k _{rec}	σ _s , МКМ	Диаметр приемной антенны (D = 13.2 м)	
		P _e _non_Code	P _e _Code (1023,781)
0.391	250	0.029	0.034
0.411	240	0.027	0.020
0.450	220	0.023	3.200E-3
0.488	200	0.019	2.300E-4
0.526	180	0.017	9.000E-6
0.580	150	0.014	3.500E-8
0.597	140	0.013	4.000E-9
0.629	120	0.012	4.500E-11
0.657	100	0.011	4.000E-13

Заключение

— Применение помехоустойчивого случайного кода позволяет обеспечить вероятность ошибки передаваемых данных менее 10^{-3} при КИП более 0.48 (до 200 мкм СКО поверхности) при диаметре приемной антенны 13.2 м.

— Применение помехоустойчивого случайного кода позволяет обеспечить вероятность ошибки передаваемых данных менее 10^{-3} при КИП более 0.391 (до 250 мкм СКО) для антенн диаметром 15 и 22 м.

— Для антенны диаметром 22 м применение помехоустойчивого случайного кода позволяет снизить мощность передатчика вдвое (на -3 дБ), со 100 до 50 Вт, обеспечивая при этом заявленную помехоустойчивость передачи данных. Снижение мощности передатчика особенно актуально в условиях энергодефицита при автономном функционирования КА.

— Помехоустойчивость передачи данных тропосферных линий связи может снижаться вследствие ослабления радиоволн в гидрометеорах. Приведенные данные по вероятностям ошибок носят оценочный характер. Для более точного определения параметров в конкретных условиях необходимы эксперименты по анализу прохождения радиоволн мм-диапазона в тропосферном канале.

Литература

Андреанов М. Н., Костенко В. И., Лихачев С. Ф. Влияние тропосферы на пропускную способность линии связи «космический аппарат – наземная станция слежения» // Космические исследования. 2019. Т. 57, № 4. С. 278–283.

Андреанов М. Н., Костенко В. И., Лихачев С. Ф. О повышенной 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.

Варагузин В. Вблизи границы Шеннона // Телемультимедиа. 2005. № 6. С. 3–10.

Коржик В. М., Финк Л. М., Щелкунов Н. Н. Расчет помехоустойчивости передачи дискретных сообщений. Справочник / Под. ред. Л. М. Финка. М.: Радио и связь. 1981. 231 с.

Окунев Ю. Б. Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами. М.: Радио и связь. 1991. 296 с.

Рекомендация МСЭ-R P.372-13 (09/2016). Радиосум.

Рекомендация МСЭ-R P. 676-10 от 09/2013.

Рытов С. М., Кравиц Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 463 с.

Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.

Хелстром К. Квантовая теория проверки гипотез и оценивания. М.: Мир, 1979. 344 с.

Andrianov M. N., Korbakov D. A., Pozidaev V. N. Error probabilities in the millimeter-wave channel in the communication line “Spacecraft — Ground Tracking Station” taking into account arctic climatic conditions // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2022. Vol. 49, no. 8. P. 266–270.

Kou Y., Lin S., Fossorier M. P. C. Low-density parity-check codes based on finite geometries: a rediscovery and new results // IEEE Trans. On Inform. Theory. 2001. Vol. 47, № 7. P. 2711–2735.

Moon T. K. Error correction coding. Wiley interscience. 2005. 756 p.

Sabir Y., Majeed S. 60 – to 80 – GHz LNA boost T-band radios // Microwaves & RF. 2015. P. 51–56.