

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛУНЫ В КАЧЕСТВЕ ПАССИВНОГО РЕТРАНСЛЯТОРА

Для передачи коротких сообщений на дальние расстояния (1000 км и более) традиционно используют тропосферные и метеорные каналы связи. При этом прерывистый характер образования канала связи, а также необходимость использования передатчиков большой мощности и громоздких антенных систем ограничивают области применения данных видов связи. Несмотря на это, тропосферная или метеорная связь часто являются единственно возможными видами связи на большие расстояния, например при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Альтернативой указанным системам связи при сравнимых энергетических характеристиках может служить канал связи с использованием Луны в качестве пассивного ретранслятора (см. рис.1). Достоинствами данного вида связи являются: непрерывность существования в течение всего времени нахождения Луны над горизонтом; гибкость в отношении выбора рабочей частоты и режима работы (в случае необходимости требуется лишь изменение условий работы наземного оборудования); возможность использования Луны для одновременной ретрансляции на различных частотах разными системами без создания взаимных помех; отсутствие дополнительного оборудования на лунной поверхности. Однако считавшийся перспективным до шестидесятых годов прошлого века, с развитием спутниковых систем этот вид дальней связи утратил свою привлекательность и до недавнего времени оставался лишь в арсенале энтузиастов радиолобителей, которые накопили богатейший экспериментальный материал по Лунным связям на частотах от 28 МГц до 47 ГГц.

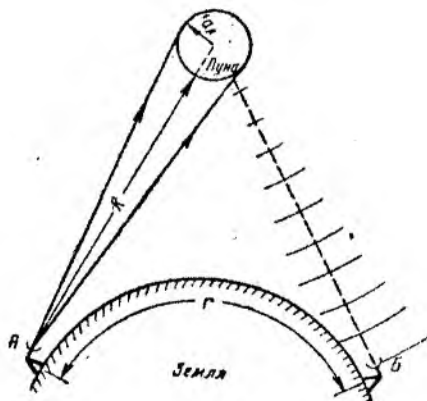


Рис. 1

Достижения в цифровой обработке сигналов позволяют по-новому взглянуть на возможность применения данного метода не только для целей любительской связи. Интерес к этому виду связи возрос после того, как в 2005 г. J. Taylor, лауреат Нобелевской премии за достижения в области физики, опубликовал коммуникационный цифровой протокол, позволяющий осуществлять радиосвязь при экстремально низких отношениях сигнал/шум [2, 3, 5].

Принципы работы основных протоколов связи с отражением сигналов от Луны и вопросы оценки эксплуатационных характеристик систем связи, реализующих эти протоколы, детально рассмотрены в работах [1–5]. Имеются публикации, посвященные математическому анализу энергетических характеристик и экспериментальному исследованию таких систем связи [10, 12]. Однако в известных источниках пока отсутствуют результаты математического моделирования функционирования систем цифровой связи с отражением сигналов от поверхности Луны и оценки на их основе потенциальных характеристик таких систем при использовании различных цифровых протоколов, хотя и указывается на актуальность таких исследований [6].

В данной работе сделана попытка устранить этот пробел. В основу модели положены принципы функционирования коммуникационного протокола JT65 [2, 3, 5]. Моделирование проводилось в системе компьютерной математики MATLAB7 с использованием пакета расширения Communication Toolbox. Схема математической модели в предположении использования сигналов CPFSK (Continuous Phase Frequency Shift Keying) модуляции изображена на рис. 2. Непрерывность фазы, присущая частотно-манипулированным сигналам при их цифровом синтезе, позволяет получить выигрыш при приеме в 4 – 5 дБ по сравнению с обычной FSK.

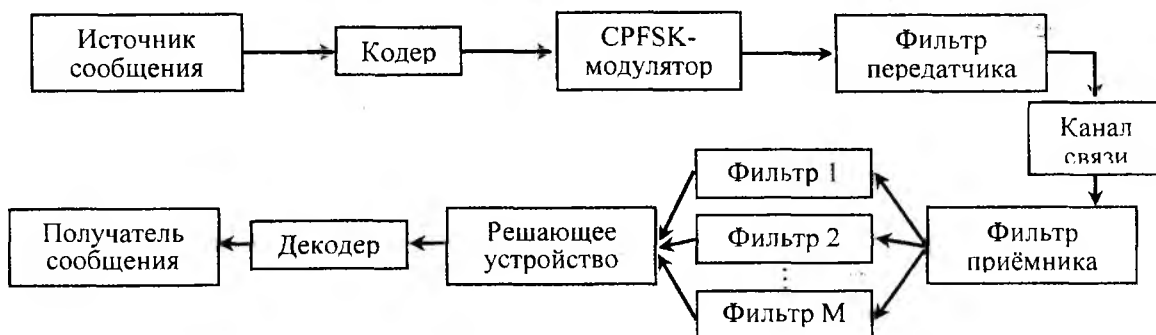


Рис. 2

Представим излучаемый CPFSK сигнал в виде суммы составляющих:

$$x_{\Sigma} = \sum_{i=1}^L x_i, \quad (1)$$

где  $x_i = \sin 2\pi f_{S_i} t$ ,  $t \in [t_{i-1} \dots t_i]$ ,  $S_i \in [0 \dots M - 1]$ ,  $M$  – количество позиций модуляции;  $L$  – количество модуляционных символов на интервале передачи (длина сообщения). Спектр сигнала  $x_{\Sigma}$  на интервале времени  $t_{i-1} \dots t_i$  изображен на рис. 3.

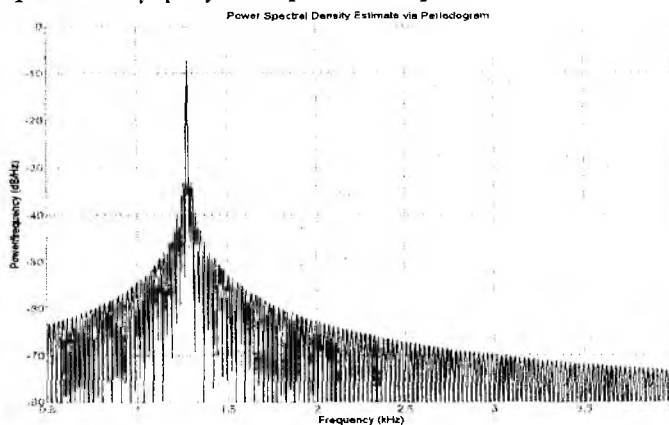


Рис. 3

Если  $z_k(t_{i-1} \dots t_i)$  – отклик  $k$ -го фильтра на воздействие входного сигнала на интервале времени  $t_{i-1} \dots t_i$ , то решающее устройство принимает решение о значении переданного на данном интервале символа согласно критерию

$$\hat{x}(t_{i-1} \dots t_i) = \max(z_k(t_{i-1} \dots t_i)). \quad (2)$$

Таким образом, можно осуществлять демодуляцию сигнала вычислением частоты наиболее интенсивной спектральной составляющей на интервале длительности канального символа. Данный подход подразумевает наличие на приемной стороне информации о соответствии частоты принимаемого сигнала значению переданного символа и, что наиболее важно, весьма точную синхронизацию по времени и частоте между приемником и передатчиком.

Оценим эффективность данного метода. Для этого воспользуемся средствами MATLAB с пакетом расширения Communication Toolbox. Предположим сначала, что связь осуществляется по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). При этом используется 4-CPFSK ( $M = 4$ ); частотный разнос между символами модуляции  $\Delta F = \frac{1}{T_S}$  (Гц), где  $T_S = \frac{1}{V_S}$ , (с); помехоустойчивое кодирование отсутствует.

На рис. 4 показаны графики зависимости вероятности символьной ошибки при разных скоростях передачи  $V_S$ , полученные в результате моделирования.

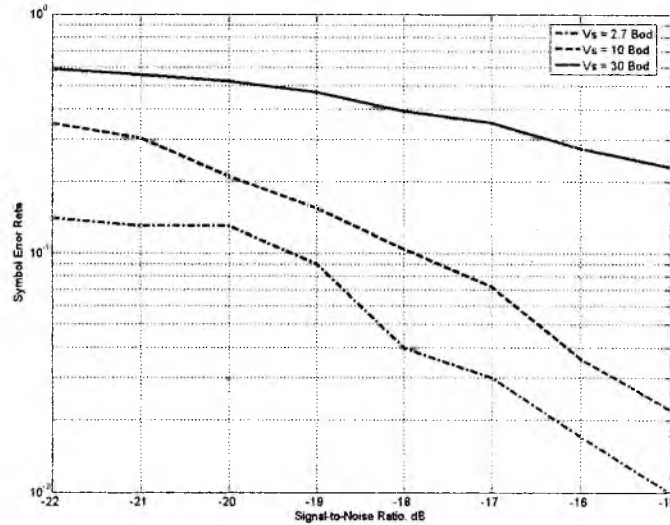


Рис. 4

Как видно, вероятность ошибки в символе растет при увеличении символьной скорости, что обусловлено уменьшением отношения энергии символа к интенсивности шума  $E_S/N_0$  при сокращении длительности символа.

В рассмотренной упрощенной модели не учитываются в полной мере изменения сигнала на трассе Земля – Луна – Земля. Как свидетельствуют данные, полученные при экспериментальных исследованиях линий связи данного типа [7 – 10, 12], для адекватного описания влияний, которым подвержен сигнал на трассе распространения, необходимо, как минимум, учесть влияние доплеровского смещения частоты и расширения спектра сигналов.

Для учета влияния данных факторов на качество связи введем в структуру сигнала "синхронизирующий тон", который передается в паузах между соседними символами модуляции. Излучаемый сигнал представлен на рис. 5 во временной области и на рис. 6 – в частотной.

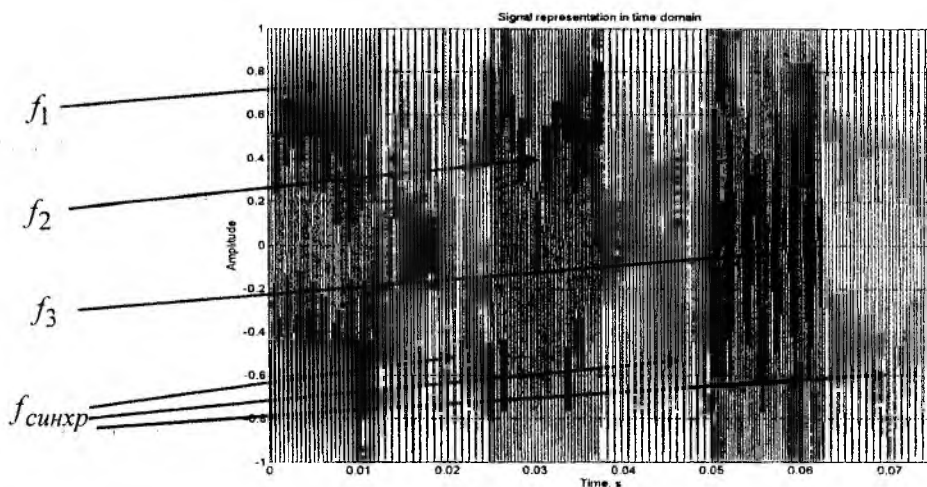


Рис. 5

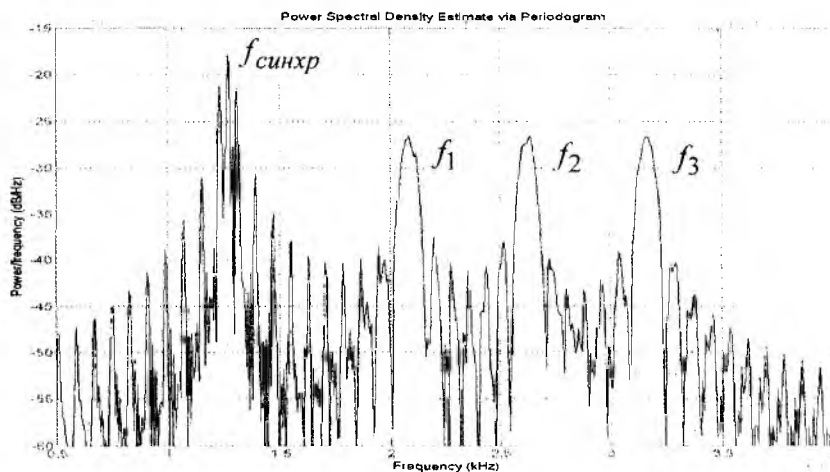


Рис. 6

Видно, что половину времени передачи занимает излучение синхронизирующего тона (рис. 5), поэтому его спектральная составляющая имеет наибольшую интенсивность (рис. 6). Возможный алгоритм обработки принятого сигнала приведен на рис. 7.

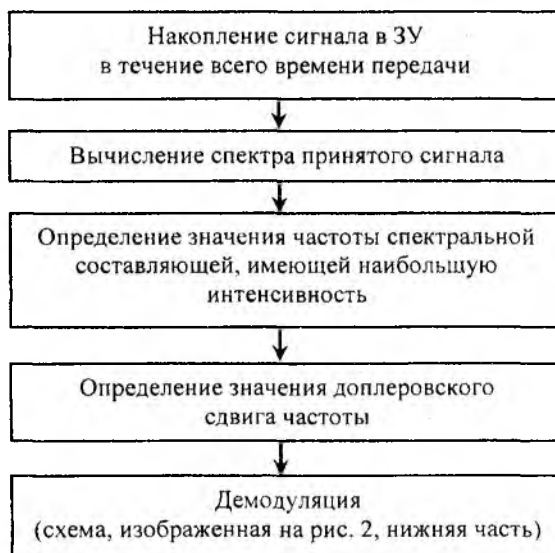


Рис. 7

Для оценки эффективности данного подхода введем в модель следующие изменения. При формировании сигнала на передающей стороне после каждого информационного символа введем синхронизирующий интервал, в котором передается синхронизирующий тон ( $f_c = 1270$  Гц). При этом положим, что длительность синхронизирующего интервала равна длительности информационного символа. На приемной стороне после накопления сигнала с помощью преобразования Фурье определяется значение частоты спектральной составляющей с максимальной интенсивностью, которая и будет синхронизирующим тоном. По разности частот принятого и переданного синхронизирующих тонов легко определить значение доплеровского сдвига частоты.

Для учета влияния расширения спектра отраженного от Луны сигнала рассмотрим, какими отражающими свойствами обладает лунная поверхность в радиочастотном диапазоне. Из данных астрофизики и радиоастрономии [7–9] следует, что поверхность Луны в данном диапазоне отнюдь нельзя считать гладкой, а правильнее рассматривать как шероховатую (рис. 8). По этой причине происходит многолучевое отражение сигнала от "шероховатой" поверхности Луны. За счет вращения Луны (рис. 9) каждый луч имеет свой доплеровский

сдвиг [10]. В сумме эти лучи дают шумоподобный сигнал, ширина спектра которого зависит от рабочей длины волны [10]:

$$\Delta F_{отр} = \frac{4L_t R_{\text{Л}}}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $L_t \approx 12 \cdot 10^{-7}$  1/с, [10].

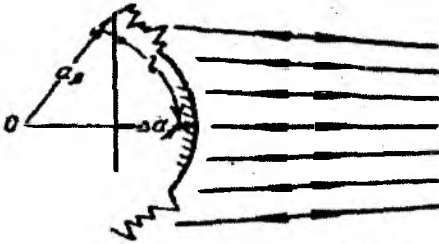


Рис. 8

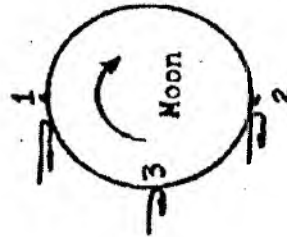


Рис. 9

Так, если передатчик ЗС облучает поверхность Луны сигналом с частотой 144 МГц, величина  $\Delta F_{отр}$  отраженного сигнала составит всего около 4 Гц, на частоте 1296 МГц ширина спектра отраженного сигнала будет составлять 36 Гц, а на частоте 10 ГГц  $\Delta F \approx 278$  Гц.

График зависимости ширины спектра отраженного от Луны сигнала от рабочей длины волны приведен на рис. 10.

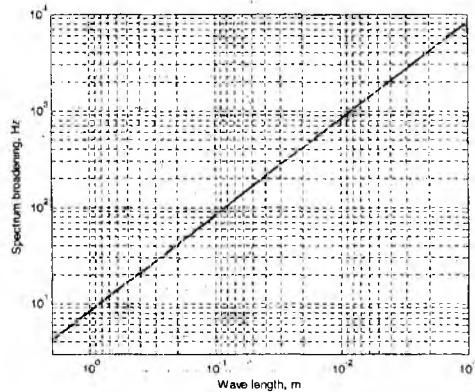


Рис. 10

Для учета указанного явления введем в модель расширение спектра отраженного сигнала. При этом для упрощения примем, что в отраженном сигнале амплитуды спектральных составляющих в полосе  $\Delta F_{отр}$  распределены по нормальному закону:

$$p_A(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta F_{отр}}} \exp\left(-\frac{f - f_{S_i}}{2\Delta F_{отр}}\right), \quad (4)$$

где  $f_{S_i}$  – частота тона, излучаемого за время  $t_{i-1} \dots t_i$ ;  $\Delta F_{отр}$  – ширина спектра отраженного тона, которая определяется согласно выражению (3).

Убывание амплитуд спектральных составляющих по мере удаления от центральной частоты (передаваемого тона в интервал времени  $t_{i-1} \dots t_i$ ) хорошо согласуется с экспериментальными данными [1]. На рис. 11 представлен спектр сигнала до отражения от поверхности Луны, а на рис. 12 – после отражения от поверхности Луны при различной ширине спектра отраженного сигнала  $\Delta F_{отр}$ .

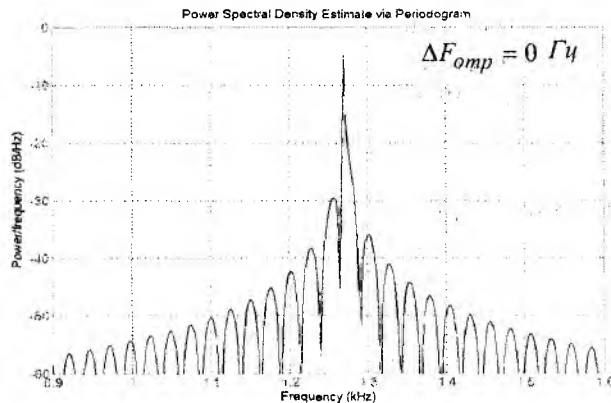


Рис. 11

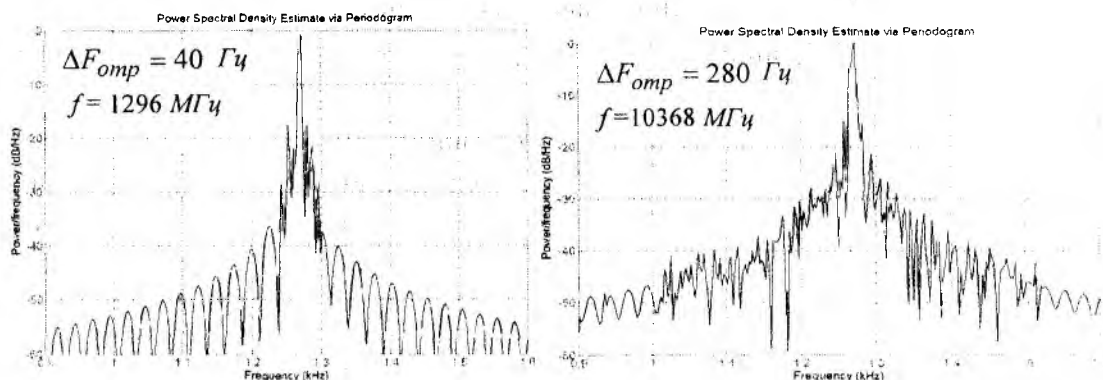


Рис. 12

Оценим эффективность алгоритма (рис. 7) при наличии в канале помимо АБГШ также доплеровского смещения частоты и расширения спектра сигнала. Графики зависимости коэффициента символьных ошибок от отношения сигнал/шум при различной ширине спектра отраженного сигнала приведены на рис. 13. Доплеровское смещение частоты составляет 100 Гц, скорость передачи канальных символов  $V_S = 10$  Бод.

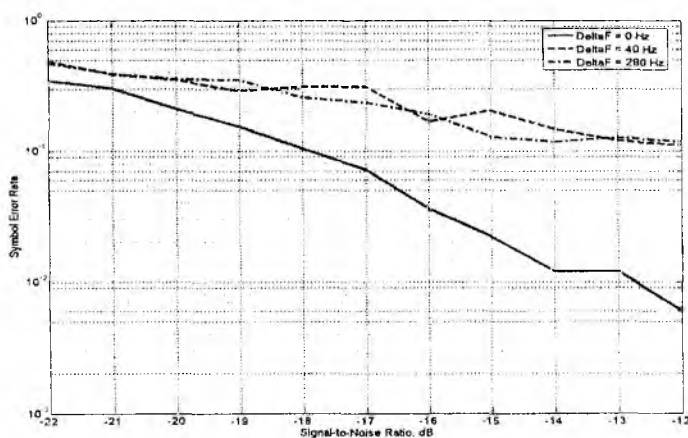


Рис. 13

Рост коэффициента символьных ошибок с увеличением частоты сигнала ограничивает применимость рассмотренного алгоритма трехсантиметровым диапазоном, где величина  $\Delta F_{omp}$  еще не принимает больших значений. В то же время следует отметить высокую эффективность данного метода при малых отношениях сигнал/шум в канале. Полученные результаты не являются пределом, т.к. в модели не учтена возможность помехоустойчивого кодирования.

ния сообщений, например с использованием кодов Рида–Соломона. Уменьшить негативное влияние расширения спектра отраженных сигналов можно путем увеличения частотного раз- носа между соседними символами CPFSK-модуляции при фиксированной символьной скоро- сти. Эффективность такого решения может быть весьма высока и подлежит дальнейшему ана- лизу.

Оценим потенциальные характеристики данного протокола. Для этого определим энер- гетику радиолинии Земля – Луна – Земля (рис. 1), воспользовавшись уравнением передачи:

$$P_{ПРБ} = P_{ПДА} - \Delta W_{АФТ_A} + G_A - W_0 - W_{дон} + G_B - \Delta W_{АФТ_B}, \quad (5)$$

где  $P_{ПДА}$  – мощность передатчика станции А, дБ;  $\Delta W_{АФТ_A}$  – потери в антенно-фидерном тракте станции А, дБ;  $G_A$  – коэффициент усиления антенны станции А, дБ;  $W_0$  – потери в свободном пространстве (также включают в себя потери, связанные с отражением сигнала от поверхности Луны), дБ;  $W_{дон}$  – дополнительное затухание радиосигнала, дБ;  $G_B$  – коэф- фициент усиления антенны станции Б, дБ;  $\Delta W_{АФТ_B}$  – потери в антенно-фидерном тракте станции Б, дБ.

Потери в свободном для частоты 10368 МГц (длина волны 3 см) составляют 287,9 дБ. Тогда, приняв  $W_{дон} = 1,7$  дБ (предполагается использование антенн с круговой поляризацией сигнала, при этом поляризационные потери ничтожно малы, а дополнительные потери состоят из потерь в атмосфере и осадках),  $G_A = G_B = 46,8$  дБ (коэффициент усиления прямофокусной параболической антенны диаметром 2,7 м),  $\Delta W_{АФТ_A} = \Delta W_{АФТ_B} = 0,2$  дБ, получим:

$$P_{ПРБ} = P_{ПДА} - 0,2 + 46,8 - 287,9 - 1,7 + 46,8 - 0,2 = P_{ПДА} - 196,4 \text{ дБ.}$$

При известном значении чувствительности приемника  $P_{ПРБ \text{ пред}}$  можно найти зависимость отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника от мощности передатчика. Приняв для расчета  $P_{ПРБ \text{ пред}} = -183,64$  дБВт, получим:

$$P_{ПРБ} - P_{ПРБ \text{ пред}} = P_{ПДА} - 213,45 - (-183,64) = P_{ПДА} - 12,76 \text{ дБ.}$$

График зависимости отношения сигнал/шум на входе приемника от мощности пере- датчика приведен на рис. 14.

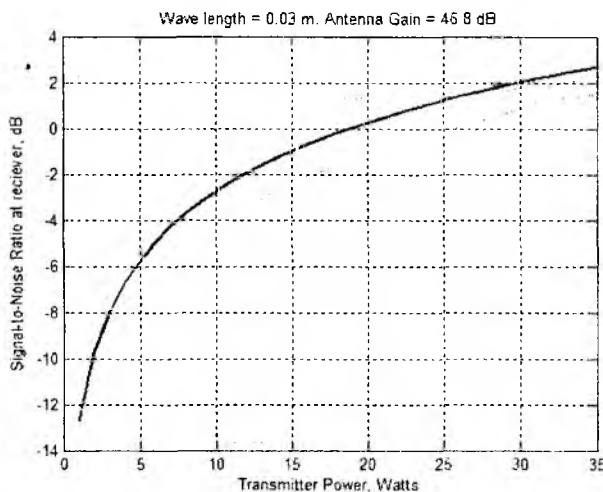


Рис. 14

В диапазоне 10 ГГц уровень принимаемого сигнала сравнивается с шумовым порогом приемного устройства при весьма малой мощности передатчика 15 – 20 Вт. При этом следует учесть, что достоверная передача информации может быть обеспечена при отношениях сигнал/шум гораздо меньших 0 дБ (см. рис. 4, 12). Энергетический выигрыш кодирования при

использовании помехоустойчивых кодов Рида–Соломона может еще более снизить требования к мощности передатчика.

Результаты моделирования показали принципиальную возможность достоверной передачи данных при отношении сигнал/шум в канале менее – 5–10 дБ с использованием частотной манипуляции с непрерывной фазой даже без применения помехоустойчивого кодирования. Это позволяет организовывать связь в диапазоне 10 ГГц с использованием передатчиков мощностью около 10 – 5 Вт и офсетных антенн диаметром 2 м. Энергетический выигрыш при использовании помехоустойчивых кодов Рида–Соломона позволит дополнительно снизить требования к оборудованию приемопередающих станций.

**Список литературы:** 1. *Жутяев С.* Принципы построения программы "Millimeter Wave CW Exchanger". // <http://www.vhfdx.ru/eme/mwcv-exchanger-principals>, 2005. 2. *Joe Taylor.* Open Source WSJT: Status, Capabilities, and Future Evolution // 12th International EME Conference. Wurzburg, August 25–27, 2006. 3. *Joe Taylor.* WSJT: New Software for VHF Meteor-Scatter Communication // QST, Dec 2001 4. *Joe Taylor.* MAP65 status report // [http://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/MAP65\\_Status.txt](http://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/MAP65_Status.txt), 2008. 5. *Joe Taylor.* WSJT6: User's Guide & Reference Manual // [http://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/WSJT\\_User\\_600.pdf](http://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/WSJT_User_600.pdf), 2006. 6. *Joe Taylor.* SimJT User's Guide // [http://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/SimJT\\_User.pdf](http://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/SimJT_User.pdf), 2006. 7. *В. С. Вавилов.* Опыты по радиолокации Луны // УФН, 1949. Т. 39, № 3. С. 359-370. 8. *Evans J. V.* Radio Communications Via the Moon // 100 Years of radio. Conference publication 411 // IEE, 1995. 9. *Папалекси Н. Д.* Об измерении расстояния от Земли до Луны с помощью электромагнитных волн // УФН. 1946. Т. 29, № 3-4. С. 250-268. 10. *The Crawford Hill VHF Club: Technical Report № 16.* January, 1974. 11. *Рудницкий Г. М.* Конспект лекций по курсу "Радиоастрономия". Нижний Архыз: "CYGNUS". 2001 г. 12. *Joe Taylor.* Earth-Moon-Earth (EME) // ARRL Handbook. Chapter 30. EME Communications. 2010.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 11.09.2009*