

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНЕЙНОГО КОДА RZ

СПЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛІНІЙНОГО КОДУ RZ

SPECTRAL EFFICIENCY OF A LINEAR RZ CODE

Аннотация. В данной работе рассматривается возможность сохранения спектральной эффективности ВОСП при переходе от линейного кода NRZ к коду RZ.

Анотація. У даній роботі розглядається можливість збереження спектральної ефективності ВОСП при переході від лінійного коду NRZ до коду RZ.

Summary. In this paper we consider the possibility of saving the spectral efficiency of FOTS during the transition from linear NRZ code to RZ code.

Общей проблемой сегодня является увеличение спектральной эффективности систем передачи. Спектральная эффективность [1] – отношение скорости передачи данных к используемой полосе частот. Следовательно, уменьшение полосы частот сигнала приводит к повышению спектральной эффективности. Полоса частот сигнала зависит от многих факторов, в том числе от используемого линейного кода. В современных сетях связи применяются различные линейные коды.

Код без возвращения к нулю – Non Return to Zero (NRZ) представляет собой двоичную последовательность, в которой длительность импульса равна длительности тактового интервала. В коде с возвращением к нулю – Return to Zero (RZ) единица передается импульсом вдвое меньшей длительности, что приводит к расширению необходимой полосы [2].

В системах передачи на металлическом кабеле в основном применялся код NRZ, так как уменьшение длительности импульса приводило к расширению необходимой полосы частот [2], а значит, к увеличению затухания, уменьшению длины участка регенерации и, как следствие, увеличению стоимости линейного тракта.

В настоящее время в ВОСП применяются RZ и RZ-подобные коды (код СМІ, код с поочередной инверсией единиц, Манчестерский код), так как смена уровня на середине тактового интервала позволяет значительно упростить выделение тактовой частоты в приемнике. При этом расширение полосы вдвое не изменяет длины участка, потому что затухание оптического волокна практически не зависит от скорости передачи [3].

Однако появление ВОСП со спектральным разделением и уменьшенной полосой частот оптических каналов (ОК) типа DWDM и HDWDM, а также широкое использование RZ-подобных кодов с большой скоростью передачи, требует уточнения необходимой степени увеличения полосы частот ОК при переходе от кода NRZ к коду RZ.

Целью данной работы является численная оценка допустимого ухудшения спектральной эффективности и защищенности при переходе к RZ-подобным кодам.

Исследования в данной статье проводятся с помощью эквивалентной схемы тракта в виде линейного четырёхполюсника, на входе которого импульсное воздействие гауссовой формы, а на выходе его отклик имеет тоже гауссову форму. Такая модель рекомендуется для анализа в [3].

Модель (эквивалентную схему) оптического канала (ОК) логично представить тремя ФНЧ (рис. 1), отображающими:

- ФНЧ-1 – инерционность передатчика, включающего передающий оптический модуль (ПОМ);
- ФНЧ-2 – влияние дисперсии оптического волокна (ОВ) на частотные свойства ОК;
- ФНЧ-3 – инерционность приёмника, включающего приемный оптический модуль (ПрОМ).

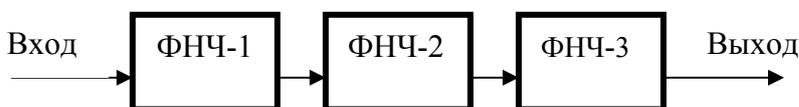


Рисунок 1 – Модель оптического канала

Пусть $f_1(t)$ – входное воздействие гауссовой формы

$$f_1(t) = A_1 e^{-a_1^2 t^2}. \quad (1)$$

Будем полагать, в дальнейшем, $A_1 = 1$.

Коэффициент a_1 зависит от длительности импульса на входе $T_{и}$, т.е. от скорости передачи – B .

В ВОСП величину $T_{и}$ принято измерять на уровне 0,5 от максимума, т.е. на уровне $0,5A_1$. Гауссово воздействие симметрично относительно $t = 0$. Это значит, что уровню $0,5A_1$ соответствует $t = 0,5T_{и}$. Поэтому

$$0,5A_1 = A_1 \cdot e^{-a_1^2 \cdot (0,5T_{и})^2}$$

или

$$2 = e^{a_1^2 \cdot (0,5T_{и})^2}.$$

Учитывая, что для линейного кода NRZ $T_{и} = T_T$, где T_T – тактовый интервал, получаем

$$a_1 = 1,66f_T,$$

где f_T – тактовая частота.

Значит гауссовый отклик линейного кода NRZ $f_{11}(\frac{t}{T_T})$ равен:

$$f_{11}(\frac{t}{T_T}) = e^{-2,76 \cdot (\frac{t}{T_T})^2}. \quad (2)$$

Аналогично гауссовый отклик линейного кода RZ $f_{12}(\frac{t}{T_T})$, для которого уровню $0,5A_1$ соответствует $t = 0,25T_{и}$, равен:

$$f_{12}(\frac{t}{T_T}) = e^{-11,09 \cdot (\frac{t}{T_T})^2}. \quad (3)$$

Спектры этих откликов соответственно равны:

$$S_{11} = \frac{1,067}{f_T} \cdot e^{-3,57 \cdot (\frac{f}{f_T})^2} \quad (4)$$

– для линейного кода NRZ,

$$S_{12} = \frac{0,533}{f_T} \cdot e^{-0,89 \cdot (\frac{f}{f_T})^2} \quad (5)$$

– для линейного кода RZ.

В соответствии с выбранной моделью фильтры не должны изменять форму импульсов и спектров, но должны вносить дисперсионные искажения, и ширина импульсов на выходе ОК на уровне 0,5 от максимума должна определяться дисперсией. Следовательно, передаточные функции фильтров имеют вид:

$$H_1(\frac{f}{f_T}) = e^{-3,57 \cdot (\frac{f}{f_T})^2 \cdot z_1^2}, \quad (6)$$

$$H_2(\frac{f}{f_T}) = e^{-3,57 \cdot (\frac{f}{f_T})^2 \cdot z_2^2}, \quad (7)$$

$$H_3(\frac{f}{f_T}) = e^{-3,57 \cdot (\frac{f}{f_T})^2 \cdot z_3^2}, \quad (8)$$

где z_1, z_2, z_3 – относительные дисперсии ПОМ, ОВ и ПрОМ, соответственно, определяемые как $z = \sigma / T_T$. Здесь σ – удельная дисперсия, а T_T – длительность тактового интервала.

Поэтому передаточная функция ОК – ВОСП равна:

$$H_{\text{OK}}\left(\frac{f}{f_T}\right) = e^{-3,57 \cdot \left(\frac{f}{f_T}\right)^2 \cdot (z_1^2 + z_2^2 + z_3^2)} \quad (9)$$

Передаточные функции фильтров ФНЧ-1 и ФНЧ-3 зависят от ширины полосы частот ПОМ и ПрОМ, которая на уровне 0,5 равна:

$$\Delta F_1 = \frac{0,44}{z_1} f_T, \quad \Delta F_3 = \frac{0,44}{z_3} f_T. \quad (10)$$

Значит

$$z_1 = \frac{0,44}{\Delta F_1} f_T, \quad z_3 = \frac{0,44}{\Delta F_3} f_T. \quad (11)$$

Поэтому,

$$H_{\text{OK}}\left(\frac{f}{f_T}\right) = e^{-3,57 \cdot \left(\frac{f}{f_T}\right)^2 \cdot [z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)]} \quad (12)$$

Спектр на выходе – произведение спектра на входе и передаточной функции ОК. Поэтому

$$S_{21}(f_H) = \frac{1,067}{f_T} \cdot e^{-3,57 \cdot f_H^2 \cdot [1 + z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)]} \quad (13)$$

$$S_{22}(f_H) = \frac{0,533}{f_T} \cdot e^{-3,57 \cdot f_H^2 \cdot [0,25 + z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)]} \quad (14)$$

где $f_H = \frac{f}{f_T}$ – относительная частота.

Сигнал на выходе тракта для кода NRZ равен

$$f_{21}(t_H) = \frac{1}{\sqrt{1 + z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)}} \cdot e^{-\frac{2,76}{1 + z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)} \cdot t_H^2} \quad (15)$$

а для RZ равен

$$f_{22}(t_H) = \frac{0,5}{\sqrt{0,25 + z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)}} \cdot e^{-\frac{2,76}{0,25 + z_2^2 + 0,2 \cdot \left(\left(\frac{f_T}{\Delta F_1}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{\Delta F_3}\right)^2\right)} \cdot t_H^2} \quad (16)$$

где $t_H = \frac{t}{T_T}$ – относительное время.

Или если $\Delta F_1 = \Delta F_3 = \Delta F_{\text{ап}}$, получаем

$$f_{21}(t_H) = \frac{1}{\sqrt{1 + z_2^2 + 0,4 \cdot \left(\frac{f_T}{\Delta F_{\text{ап}}}\right)^2}} \cdot e^{-\frac{2,76}{1 + z_2^2 + 0,4 \cdot \left(\frac{f_T}{\Delta F_{\text{ап}}}\right)^2} \cdot t_H^2} \quad (17)$$

$$f_{22}(t_H) = \frac{0,5}{\sqrt{0,25 + z_2^2 + 0,4 \cdot \left(\frac{f_T}{\Delta F_{\text{ап}}}\right)^2}} \cdot e^{-\frac{2,76}{0,25 + z_2^2 + 0,4 \cdot \left(\frac{f_T}{\Delta F_{\text{ап}}}\right)^2} \cdot t_H^2} \quad (18)$$

Полученные зависимости изображены на рис. 2, где p – увеличение полосы частот аппаратуры $\Delta F_{\text{ап}}$ по сравнению с исходной (формула 10 при $z = 0,25$).

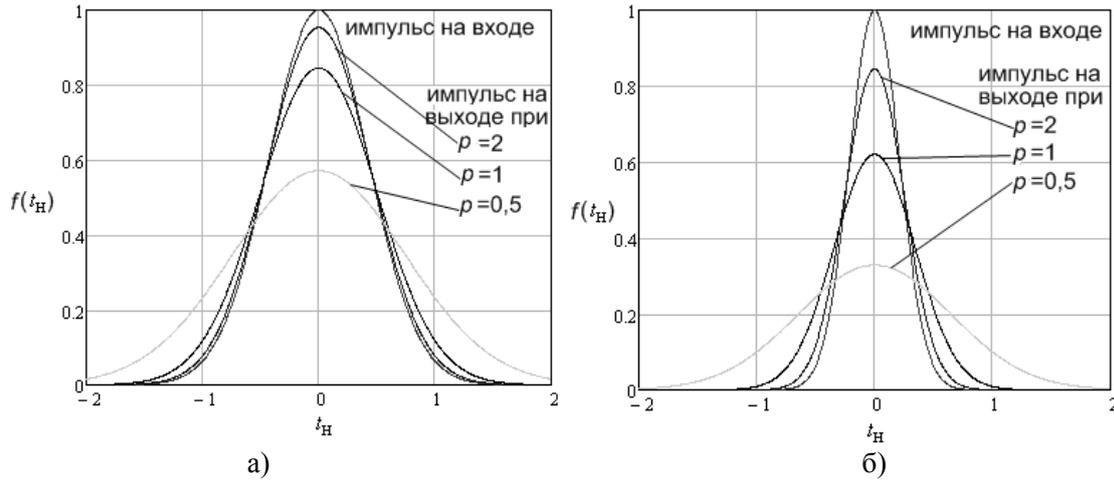


Рисунок 2 – Импульсы на входе и выходе тракта для NRZ (а) и RZ (б) кодов

Из рис. 2 видно, что увеличение полосы $\Delta F_{ан}$ вдвое при переходе от NRZ к RZ обеспечивает практически такую же величину амплитуды импульса (80 % от исходной). Если не увеличивать полосу ПрОМ, то амплитуда уменьшается до уровня 60 % от исходной.

Однако мы будем оценивать возможность и эффективность перехода к RZ не только по уменьшению амплитуды принимаемых импульсов, а также по ухудшению защищённости, которое определяется уменьшением амплитуды, увеличением шумов и дисперсии:

$$\Delta A_3 = \Delta A_{3A} + \Delta A_{3ш} + \Delta A_{3\sigma}, \quad (19)$$

где ΔA_{3A} – ухудшение защищённости за счёт уменьшения амплитуды импульсов; $\Delta A_{3ш}$ – ухудшение защищённости за счёт увеличения шумов; $\Delta A_{3\sigma}$ – ухудшение защищённости за счёт увеличения дисперсии [4].

Учитывая (10) и то, что

$$\left(\frac{f_T}{\Delta F_{ан}}\right)^2 = \left(\frac{1}{0,44p}\right)^2 = \left(\frac{2,27}{p}\right)^2 = \frac{5,16}{p^2},$$

получаем

$$0,4 \cdot \left(\frac{f_T}{\Delta F_{ан}}\right)^2 = 0,4 \cdot \frac{5,16}{p^2} = \frac{2,07}{p^2}. \quad (20)$$

Из (17), (18) и (20) видно, что для NRZ

$$\Delta A_{3A} = 10 \cdot \log\left(1 + z_2^2 + \frac{2,07}{p^2}\right), \quad (21)$$

$$\Delta A_{3ш} = 10 \cdot \log(p), \quad (22)$$

$$\Delta A_{3\sigma} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{1 - 2 \cdot e^{-\frac{2,76}{1 + z_2^2 + \frac{2,07}{p^2}}}}\right). \quad (23)$$

А для RZ

$$\Delta A_{3A} = 6 + 10 \cdot \log\left(0,25 + z_2^2 + \frac{2,07}{p^2}\right), \quad (24)$$

$$\Delta A_{3ш} = 10 \cdot \log(p), \quad (25)$$

$$\Delta A_{3\sigma} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{1 - 2 \cdot e^{-\frac{2,76}{0,25 + z_2^2 + \frac{2,07}{p^2}}}}\right). \quad (26)$$

На рис. 3 приведены зависимости ΔA_{3-NRZ} от параметра p при разных значениях $z = z_2$. Видно, что изменения ΔA для малых значений z практически совпадают.

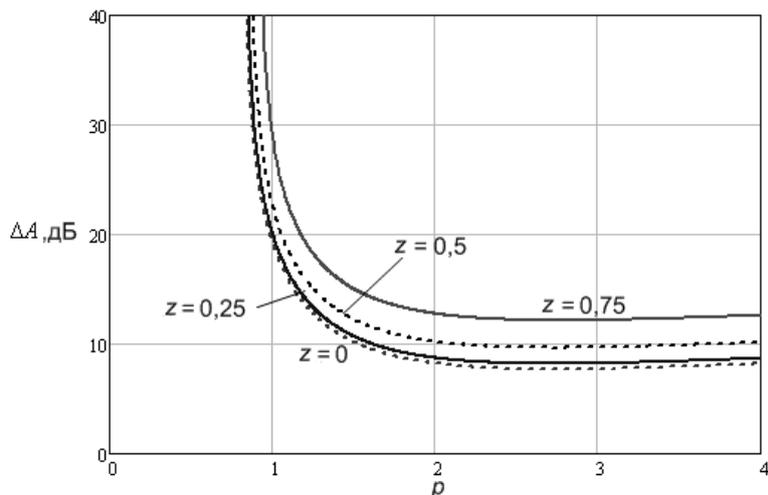


Рисунок 3 – Зависимость ухудшения защищенности от полосы пропускания аппаратуры для кода NRZ

На рис. 4 приведены составляющие общих потерь.

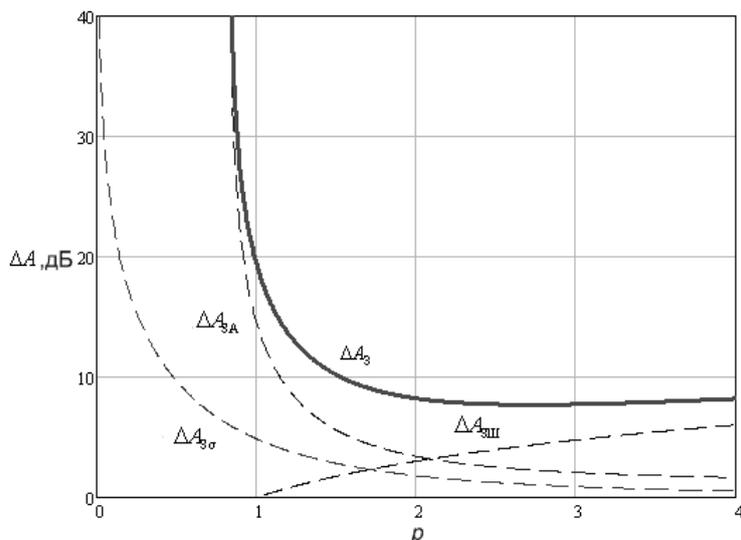


Рисунок 4 – Зависимость составляющих ухудшения защищенности от полосы пропускания аппаратуры для кода NRZ

Изменение потерь за счёт уменьшения амплитуды и увеличения шумов противоположны и поэтому их суммарный эффект остаётся почти постоянным и приблизительно равным 5 дБ.

Половину потерь (5 дБ) в общую величину потерь при $p \approx 1$ вносит МСИ, вызванные дисперсией. Величина этих потерь быстро убывает с увеличением параметра p . Дисперсионные искажения требуют увеличения параметра p , чтобы $p > 1$.

Так как эти зависимости мы используем для определения приемлемого значения p , при котором потери, вносимые инерционностью, передатчик (ФНЧ-1) и приемник (ФНЧ-3) ещё допустимы, то в дальнейшем будем игнорировать постоянную составляющую этих потерь, определяя только влияние ОВ – ФНЧ-2 (рис. 5).

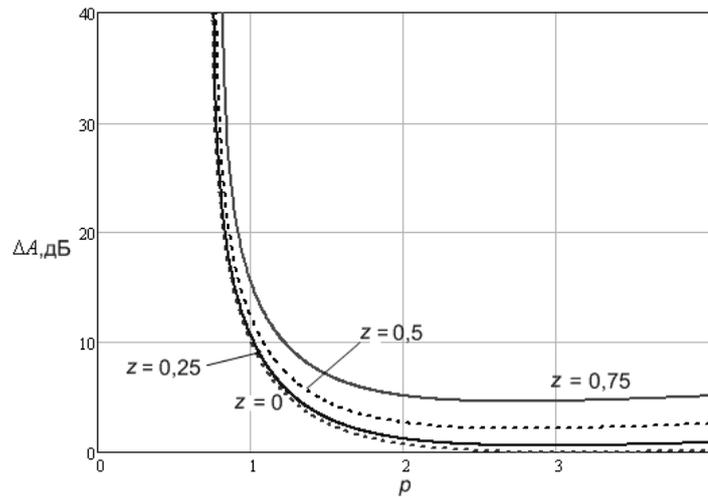


Рисунок 5 – Зависимость ухудшения защищенности от полосы пропускания аппаратуры для кода RZ

Полученные результаты позволяют сравнить ухудшение защищенности, связанное с расширением используемой полосы частот для кодов NRZ и RZ (рис. 6).

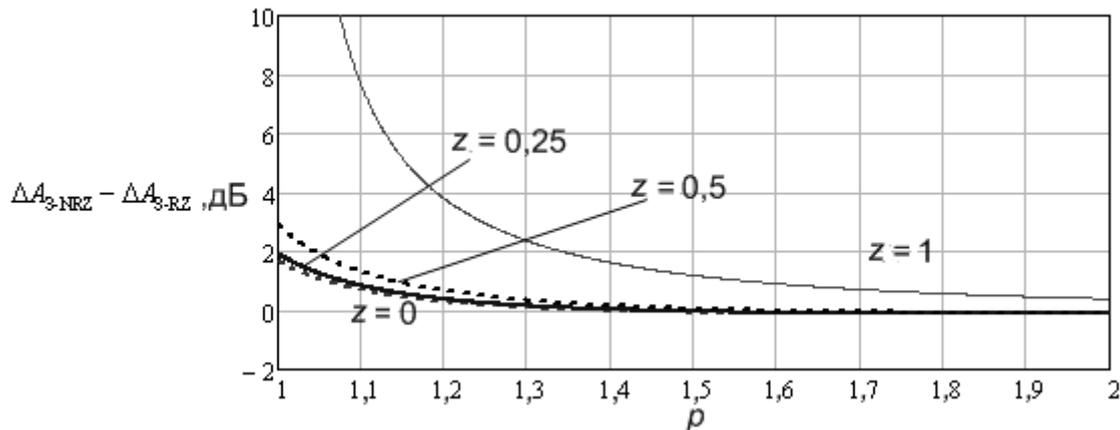


Рисунок 6 – Изменение ухудшения защищенности линейного кода NRZ по сравнению с кодом RZ

Графики рис. 6 убедительно показывают преимущества RZ по сравнению NRZ для любых значений z , а также возможность работать с RZ при $\rho = 1,2$, если $z < 0,25$.

Таким образом, можно сказать, что при переходе от линейного кода NRZ к линейному коду RZ нет необходимости в расширении полосы частот ОК вдвое. Расширение полосы частот на 20 % обеспечит практически такую же величину защищенности и, при этом, незначительно ухудшит спектральную эффективность.

В заключение можно сказать, что проведенная работа позволила численно оценить допустимое ухудшение спектральной эффективности и защищенности при переходе к RZ-подобным кодам.

Литература

1. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / [А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов, Л.В. Банкет и др.]; под ред. А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985 – 272 с.: ил.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. – [2-е изд., испр.]; пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. — 1104 с. : ил.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г.; пер. с англ. – М.: Мир, 1996.
4. Брескин В.А. Влияние дисперсионных искажений сигнала на длину регенерационной секции волоконно-оптических систем передачи / В.А. Брескин, А.Д. Мазур // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 80-84.